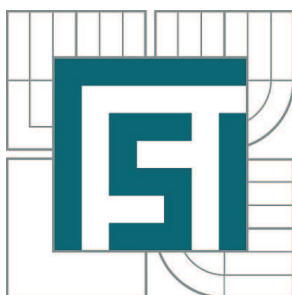


# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## DESIGN FOR SIX SIGMA

DESIGN FOR SIX SIGMA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. KRISTÝNA GREPOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Ing. Kristýna Greplová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Metrologie a řízení jakosti (3911T032)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Design For Six Sigma**

v anglickém jazyce:

### **Design For Six Sigma**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U benzinových aplikací automobilů s turbodmychadlem se používají obtokové ventily, které podléhají zátěžovým testům. Zátěžové testy mohou odhalit chyby v řešení, případně je třeba přezkoumat různé parametry a učinit závěr, jestli stejné provedení je možné použít i na jiných zástavách a velikostech motorů. K tomu je možno použít nástrojů Design For Six Sigma.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je analýza praktického uplatnění obtokového ventilu turbodmychadla automobilu užitím nástrojů Design For Six Sigma a vytvoření speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu.

1. Popis nástrojů Design For Six Sigma.
2. Analýza současného stavu.
3. Návrh přípravku.
4. Ověření přípravku.
5. Závěr.

Seznam odborné literatury:

1. Fiala, A.: Statistické řízení jakosti, prostředky a nástroje pro řízení a zlepšování procesů. VUT v Brně. Brno, 1997. ISBN 80-214-0895-2.
2. Pande, P.S., Neuman, R.P., cavanagh, R.R.: Zavádíme metodu Six Sigma (český překlad). TwinsCom, s.r.o. Brno, 2002. ISBN 80-238-9289-4.
3. The Quality Portal, Design of Experiments: Overview [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z: <[http://thequalityportal.com/q\\_know02.htm](http://thequalityportal.com/q_know02.htm)>
4. Maset, Description of the QFD Process [online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z: <<http://www.masetllc.com/products/418.shtml>>

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Koška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 9.11.2011


L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

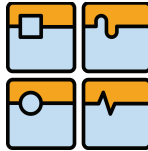
---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

Možnosti nakládání s touto prací upravuje *Smlouva o poskytnutí podkladů pro zadání a zpracování diplomové práce*, uzavřená mezi firmou Honeywell spol. s r.o. v zastoupení odštěpného závodu Honeywell, spol. s r.o. - HTS CZ o.z. jakožto zadavatelem práce a Fakultou strojního inženýrství VUT v Brně, jako zpracovatelem. Smlouva je volně přiložena k tištěné verzi této práce, která je „úplná“. Ve verzi, která má označení „veřejná“, jsou cenzurovány pasáže a kapitoly, které by mohly mít vztah k výše uvedené smlouvě.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je analýza mezi praktického uplatnění obtokového ventilu TwinScroll turbodmychadla automobilu BMW X6 M užitím nástrojů DFSS (Design For Six Sigma). Cílem je tedy vytvoření speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu s možností otestování nejrůznějších charakteristik majících vliv na klíčové parametry turbodmychadla.

**Klíčová slova:** štíhlá výroba, DFSS (Design For Six Sigma), nástroje Six Sigma, přepřínované motory, turbodmychadla, obtokový ventil, BMW Group, Honeywell Technology Solution Brno.

## ABSTRACT


The aim of the master's thesis is analysis of practical application limits of waste-gate TwinScroll turbocharger located in BMW X6 M vehicle by using DFSS (Design For Six Sigma) tools.

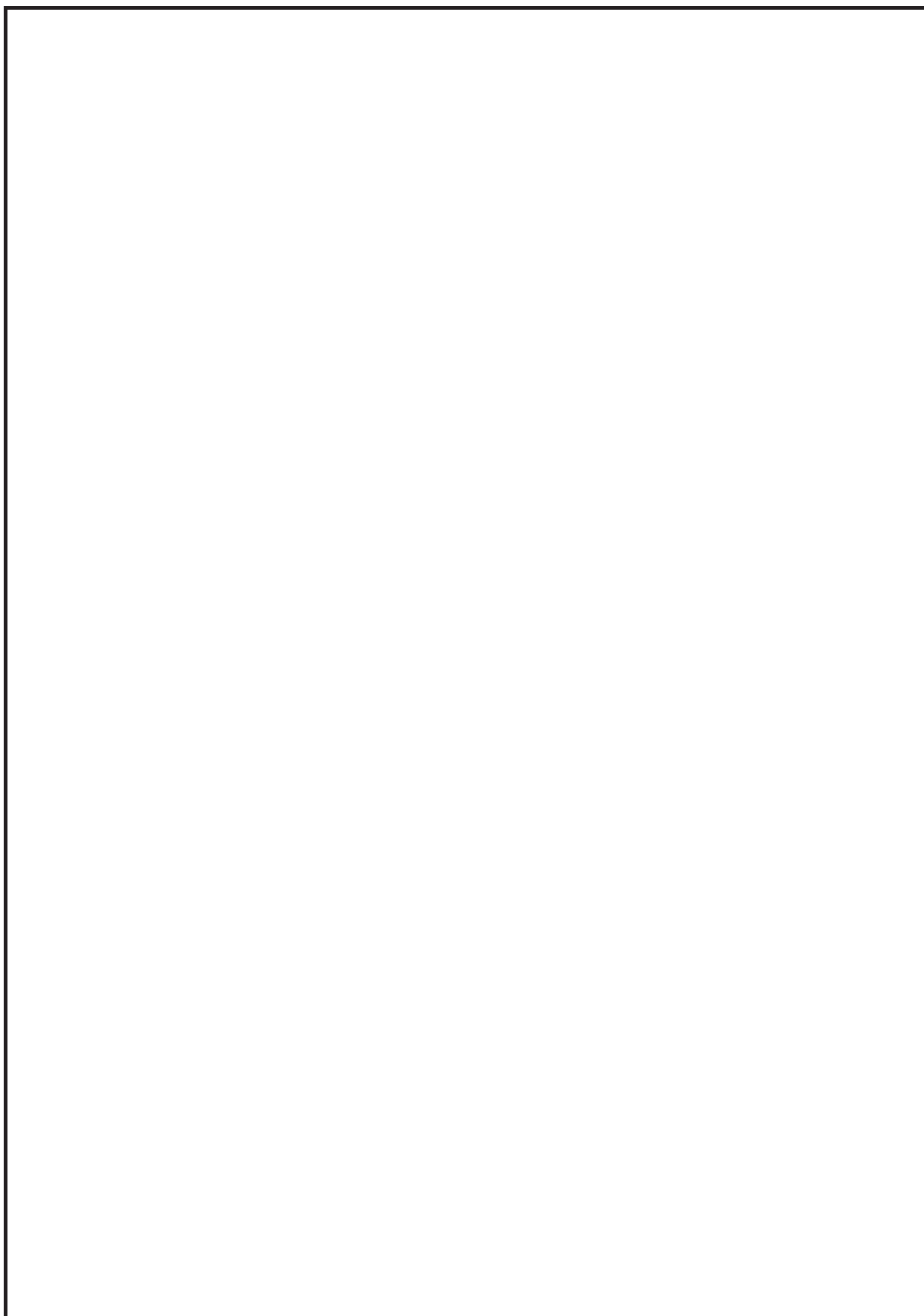
The goal is to create a special measurement device for a measurement of waste gate leakage with chance of testing all sorts of characteristics having impact on key parameters of turbocharger.

**Key words:** Lean Manufacturing, DFSS (Design For Six Sigma), Six Sigma tools, turbocharged engines, turbochargers, waste-gate, BMW Group, Honeywell Technology Solution Brno.


## Bibliografická citace:

GREPLOVÁ, K. *Design For Six Sigma*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 107 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 8
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	





	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	


## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

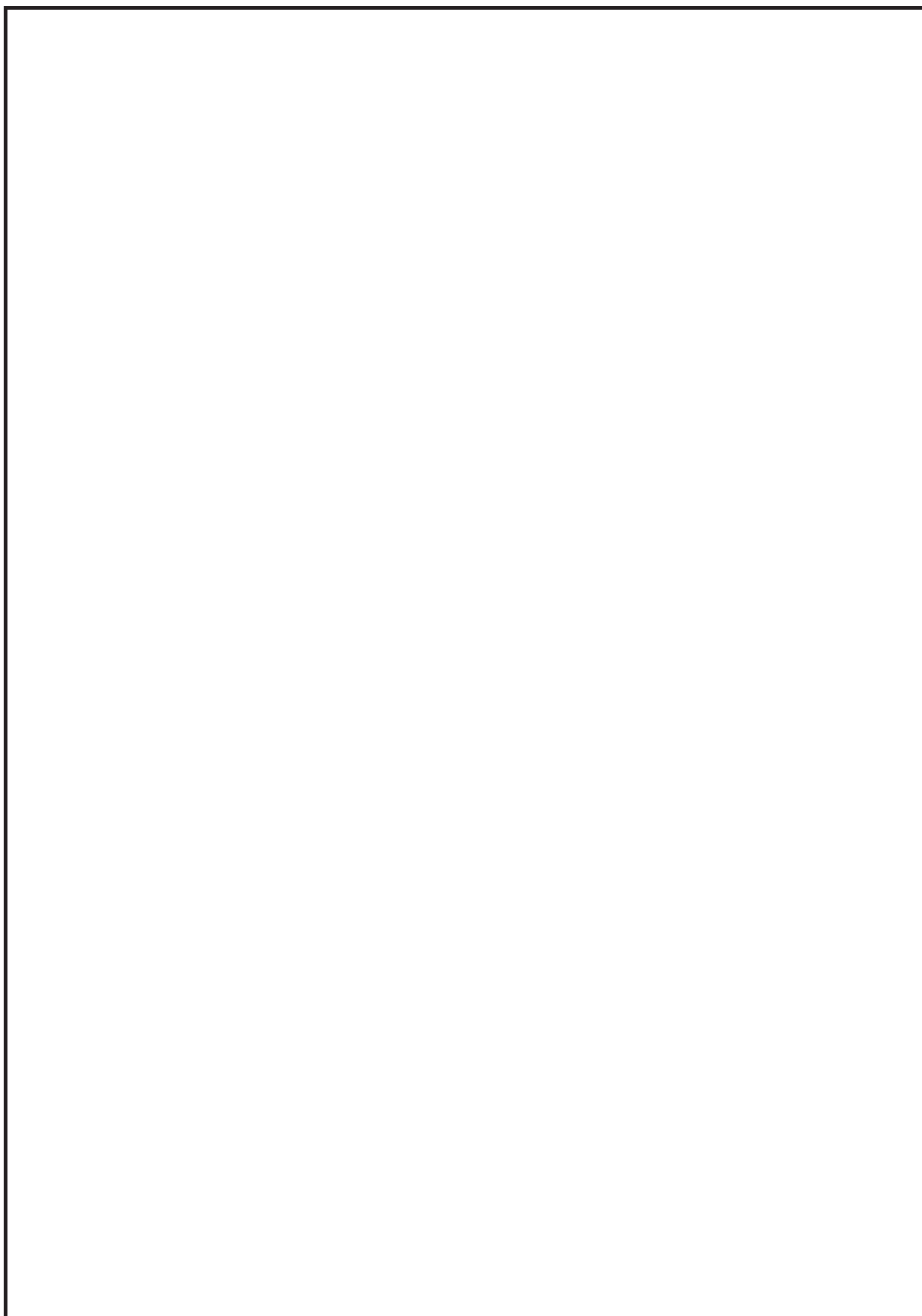
Prohlašuji, že tuto diplomovou práci *Design For Six Sigma* jsem vypracovala a napsala samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Petra Košky, Ph.D. a uvedla v seznamu všechny zdroje.


---

Kristýna Greplová

v Brně dne 20. května 2012

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

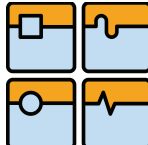


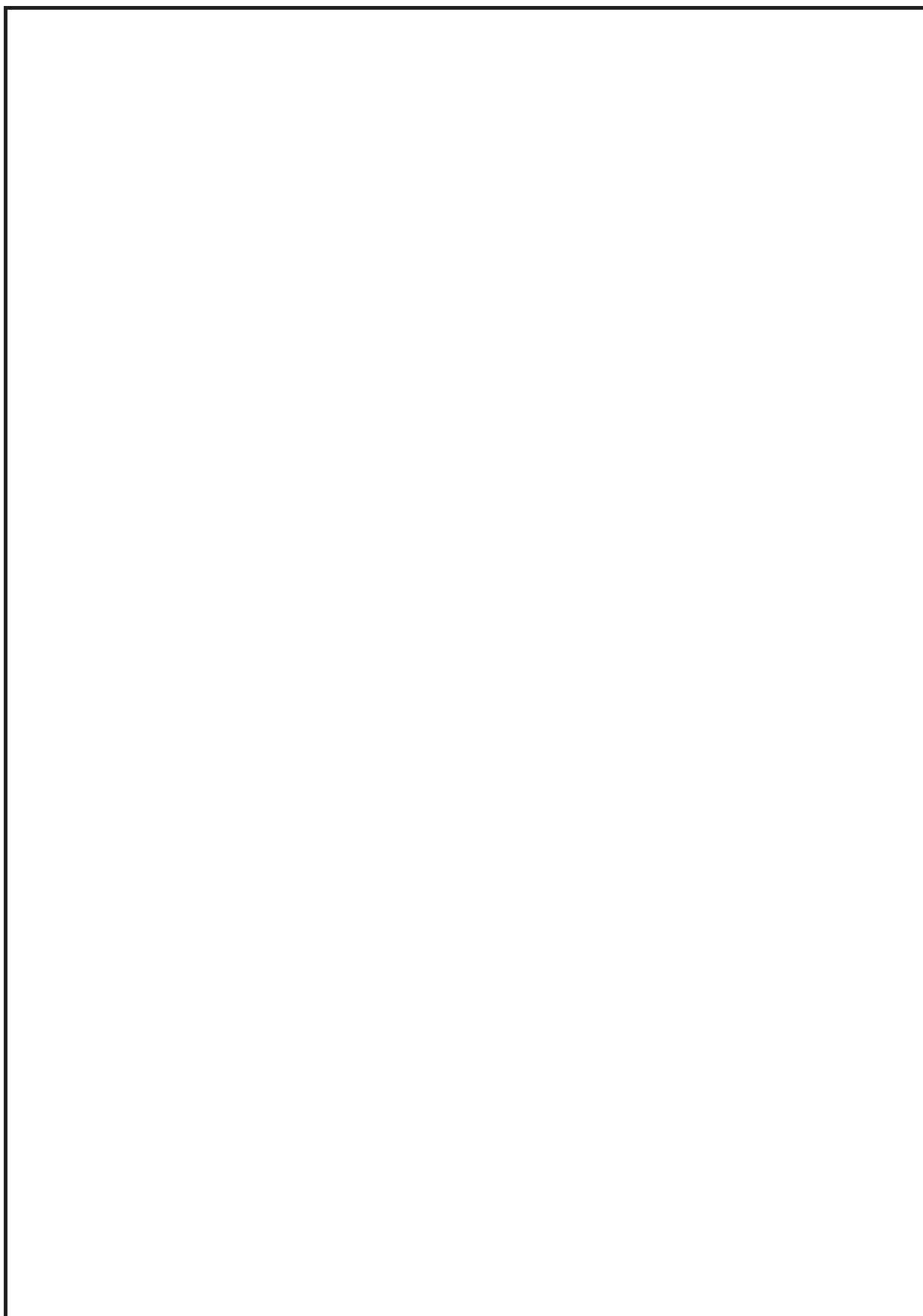
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koškovi, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky k této práci.

Dále děkuji zaměstnancům firmy Honeywell Turbo Technology v Brně za ochotu a zapůjčený materiál, který mi byl zdrojem podnětných informací a v neposlední řadě děkuji svým rodičům za poskytnuté technické a finanční zázemí.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 12
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	



## OBSAH

<b>OBSAH</b>	<b>13</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>15</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>17</b>
1.1 Lean Manufacturing	17
1.1.1 Sedm základních druhů plýtvání	17
1.1.2 Pět základních principů Lean Manufacturing	18
1.2 Integrace přístupu Lean Manufacturing do konceptu Six Sigma	19
1.2.1 DMAIC	19
1.2.2 Nástroje DMAIC	21
1.3 Design For Six Sigma (DFSS)	21
1.3.1 DMADV	21
1.3.2 DMAIC vs. DMADV	22
1.4 Honeywell Technology Solution Brno	23
1.5 Přepřínované motory	25
1.5.1 Turbodmychadla	26
1.5.2 Regulace přepřínovaných motorů	31
1.5.3 Ovládací prvky pro WG a VNT regulační systémy	35
1.5.4 Trendy ve spalovacích motorech	37
1.6 BMW Group	38
1.6.1 BMW	38
1.6.2 BMW M divize	39
1.6.3 Používané technologie BMW	39
<b>2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA</b>	<b>43</b>
<b>3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE</b>	<b>45</b>
<b>4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ</b>	<b>47</b>
4.1 Hlas zákazníka (Voice of Customer)	47
4.2 Kritické požadavky jakosti (Critical to Quality)	48
4.3 Analýza požadavků zákazníka (Quality Function Deployment)	48
4.4 Externí funkční analýza (Generic External Function Analysis)	51
4.5 Předběžné hodnocení rizik (Preliminary Risk Assessment)	51
4.6 Diagram příčin a následků (Ishikawův diagram)	52
4.7 FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)	53
4.8 DOE (Design of Experiments)	54
<b>5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ</b>	<b>55</b>
5.1 Motor BMW S63	55
5.2 Vývoj designu ramene a klapky obtokového ventilu	57
5.3 Rameno a klapka ventilu jako tzv. monoblock	60
5.4 Test životnosti turbodmychadla na reálném modelu	61
5.4.1 Výsledky zátěžových testů	62
5.4.2 Technické řešení na základě zátěžových testů	65
5.5 Test těsnosti obtokového ventilu na reálném modelu	65
5.5.1 Popis nastavení zkoušeného modelu	66
5.5.2 Experimentální nastavení a podmínky	67
5.5.3 Výsledky měření	67

5.6 Přípravek pro měření těsnosti obtokového ventilu	69
5.6.1 Popis konstrukce přípravku	70
5.7 Hlas zákazníka (Voice of Customer)	71
5.8 Kritické požadavky jakosti (Critical to Quality)	72
5.9 Analýza požadavků zákazníka (Quality Function Deployment)	73
5.10 Externí funkční analýza (Generic External Function Analysis)	75
5.11 Předběžné hodnocení rizik (Preliminary Risk Assessment)	75
5.12 Diagram příčin a následků (Ishikawův diagram)	76
5.14 FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)	77
5.12 DOE (Design of Experiments)	80
5.15.1 Kalibrace a zapojení speciálního přípravku	80
5.15.2 Metoda R&R	81
5.15.3 Měření netěsnosti obtokového ventilu GEN2	86
5.15.4 Analýza DOE	87
5.15.5 Zhodnocení získaných údajů	90
<b>6 ZÁVĚR</b>	<b>93</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>95</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>103</b>
Seznam použitých zkratk	103
Seznam použitých symbolů a veličin	104
<b>9 SEZNAM obrázků</b>	<b>105</b>
Seznam obrázků	105
<b>10 SEZNAM TABULEK</b>	<b>107</b>

## ÚVOD

Klasické atmosférické motory v dnešní době ustupují do pozadí. Současné trendy se v automobilovém průmyslu točí kolem tzv. přeplňování a atmosférické motory jsou tak postupně nahrazovány „novou“, výkonnější, ekonomičtější a spolehlivější variantou.

V situacích, kdy jsou vyčerpány všechny běžné možnosti zvýšení výkonu atmosférického motoru, přistupují často konstruktéři k dalšímu stupni a to k přeplňovanému motoru disponujícímu turbodmychadlem. Zdokonalování stávajících konstrukcí se v posledních letech dostává na samou hranici možností motoru a přeplňování je tak jednou z cest, která vede ke zvýšení výkonu a spolehlivosti, při současném snížení spotřeby a emisí. [1, 2]

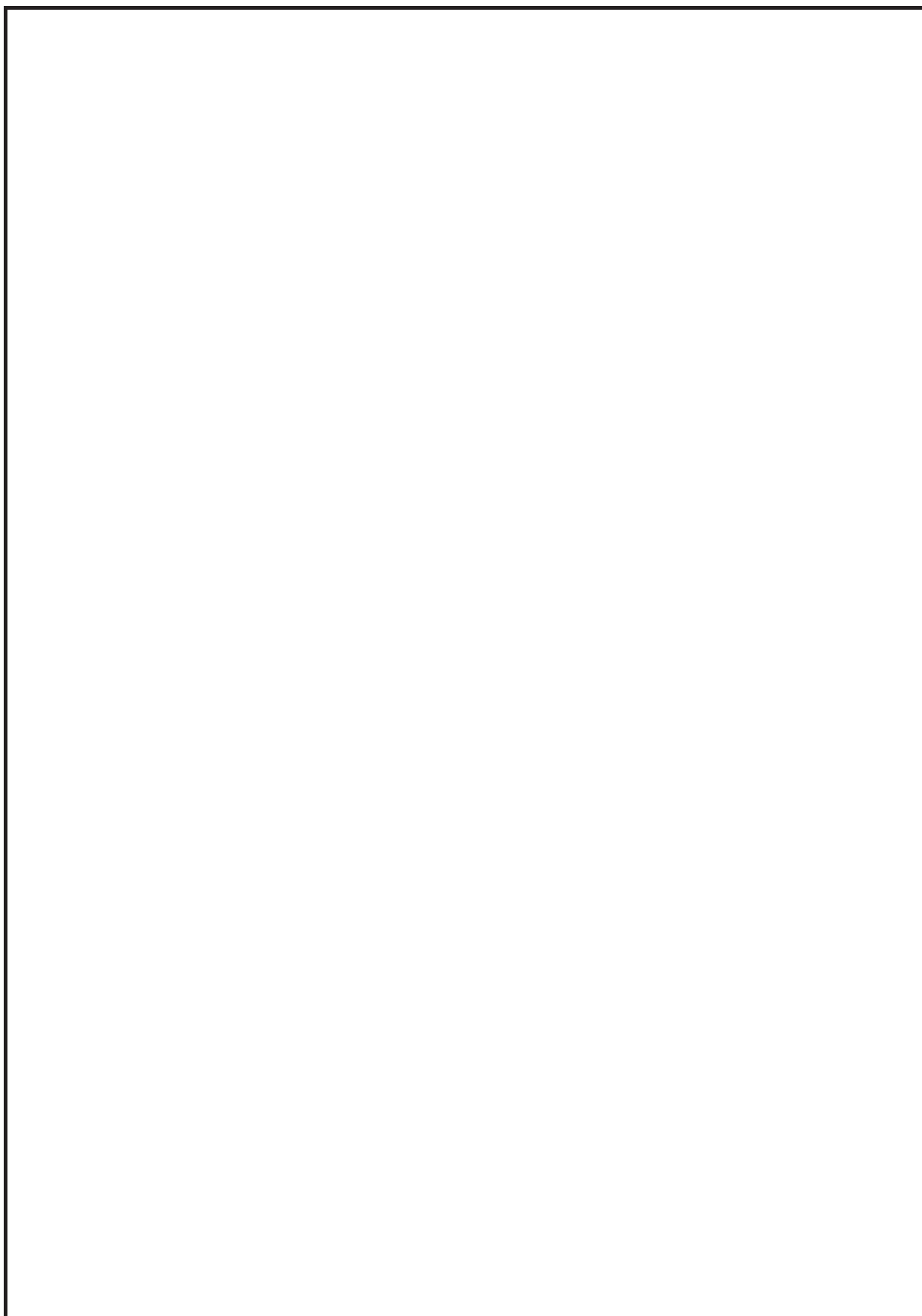
Dnešní turbodmychadla pro automobilový průmysl mají své kořeny v leteckém odvětví, i když v mnoha ohledech turbodmychadly podporované technologie používané v osobních a užitkových vozidlech, značně překonávají své průmyslové „kolegy“. Jsou schopny poskytnout mnohem vyšší výkon než je tomu v případě proudového motoru. [3]

Dřívější turbodmychadla byla primárně používána pro zvýšení výkonu vysoce výkonných sportovních vozů, avšak v současné době, díky pokroku v oblasti aerodynamiky a vysokoteplotních materiálů, je kladen důraz především na spotřebu paliva, výkon a kontrolu emisí v benzínových, naftových, jakožto i hybridních motorech. [3]

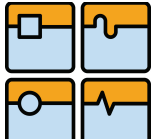
Velký pokrok v konstrukci turbodmychadel byl zaznamenán v 90. letech 20. století, kdy firma Honeywell přišla na trh s technologií VNT (Variable Nozzle Turbine) neboli s proměnnou geometrií turbínových lopatek. V důsledku této změny může být turbodmychadlo optimalizováno jak pro nízké, tak vysoké otáčky a může tak být zaručen maximální výkon se snižující se spotřebou paliva. [3]

Specialitou v oblasti nových přeplňovaných motorů je motor automobilu BMW X6 M tzv. TwinPower Turbo, do kterého firma Honeywell dodává turbodmychadlo typu TwinScroll s dvoustupňovou turbínou s dvojicí oddělených výfukových kanálů nabízejících systém stupňovitěho přeplňování motoru.

Charakteristické provedení systému obtokového ventilu turbodmychadla TwinScroll bylo speciálně navrženo pro motor BMW X6 M za účelem vyřešení problémů s WG při zátěžových testech. Takto navržený obtokový ventil nabízí výrazně lepší celkovou účinnost, nižší hlučnost a cenu oproti konkurenci.





	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 17
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 1.1 Lean Manufacturing

Štíhlá výroba neboli Lean Manufacturing často jednoduše Lean nepředstavuje konkrétní metodu výroby, ale spíše manažerskou filosofii. Hlavní myšlenkou je zbavit se všeho nadbytečného, co není potřebné a nezbytně nutné. Společnosti by tedy měli usilovat o eliminaci či alespoň redukci nadbytečných nákladů, které nepřinášejí zákazníkům užitek a tudíž by za ně nebyli ochotni zaplatit. V podstatě se Lean soustředí na zachování hodnot s menším množstvím práce. [4, 5]

Štíhlá výroba je proces odvozený především z Toyota Production System (TPS), který je znám svým zaměřením na snížení původních odpadů ke zlepšení celkové hodnoty pro zákazníka. Je mnoho způsobů, jak toho má být dosaženo a firma Toyota svým růstem z malé firmy na největšího výrobce automobilů zaměřila svou pozornost směrem, jak toho má být dosaženo. [4, 5, 6]

#### 1.1.1 Sedm základním druhů plýtvání


Plýtvání je použití jakéhokoliv materiálů nebo zdroje nad rámec toho, co zákazník požaduje a je ochoten zaplatit. Štíhlá výroba má za cíl identifikovat a odstranit plýtvání za účelem zlepšení výkonnosti podniku. Shigeo Shingo (zakladatel konceptu Poka-yoke) definoval sedm základních druhů plýtvání:

- vadné výrobky,
- nadvýroba,
- doprava,
- čekání,
- nadbytečné skladové zásoby,
- nadbytečné pohyby,
- nadbytečné zpracování [5]

a několik dalších druhů plýtvání:

- zmatek,
- nebezpečné nebo neergonomické pracovní podmínky,
- nevyužitý lidský potenciál. [5]

Výše zmíněné druhy plýtvání lze označit jako cíle pro neustálé zlepšování. Jedná se o příznaky možných problémů a úkolem projektového týmu je odstranit jejich příčiny a vyhnout se tak ztrátám.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 18
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 1.1.2 Pět základních principů Lean Manufacturing

Předpokladem Lean Manufacturing je výroba produktu přesně podle přání zákazníka, nejrychlejším a nejefektivnějším způsobem a za nejlepší možnou cenu. Existuje pět základních principů, které tvoří základ pro koncept štíhlé výroby:

- identifikovat a pochopit, co vytváří hodnotu pro zákazníka

přijetím skutečnosti, že jen zlomek celkového času a úsilí vynaloženého v organizaci připisuje přidanou hodnotu pro zákazníka. Pochopení toho, co vlastně zákazník chce je prvním krokem k identifikaci všech činností bez přidané hodnoty a zdrojů plýtvání, které mohou být následně odstraněny. [7]

- identifikovat a zmapovat tok hodnot

dokumentováním celého souboru činností ve všech částech organizace zapojené do poskytování produktů a služeb koncovému zákazníkovi. A to za účelem pochopení jaká hodnota je zákazníkovi v současném stavu nabízena a odstranění činností, které pak mohou být záměrně odstraněny. [7]

- vytvořit tok hodnot „tažený“ zákazníkem

tok hodnot je o vytváření hodnot pro zákazníka s minimálním počtem kroků procesu, s minimem přidaného času mezi jednotlivými kroky procesu a s minimálním počtem odchylek od plánovaného procesu. Hodnota toku se používá k identifikaci plýtvání, které má být odstraněno. [7]

- reagovat na „tah“ zákazníka

pochopit přání a požadavky zákazníka a vytvořit proces, který je schopen na tyto požadavky reagovat. Zkrátka vyrábět jen to, co zákazník opravdu chce a kdy to chce. [7]

- neustále zlepšovat ve snaze o dokonalost

pružná a rychlá reakce na přání a potřeby koncového zákazníka je klíčem k neustálému zlepšování procesů organizace. Podstatou konceptu štíhlé výroby je systematické a trvalé odstraňování příčin špatné kvality s konečným cílem dosažení nulové chybovosti. [7]

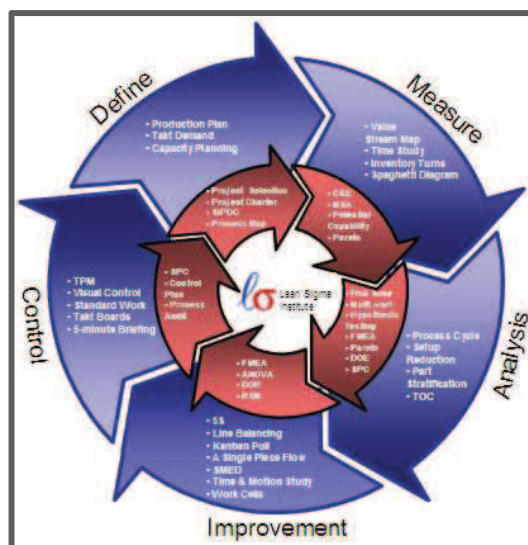
Štíhlá výroba je variací na téma efektivity založené na optimalizaci toku. Dnešní přístup se obrací směrem ke zvyšování účinnosti, snižování plýtvání a využívání empirických metod k rozhodování, které postupy a přístupy v podnikání využít před bezmyšlenkovitým přijímáním předem existujících myšlenek. [7, 8]

## 1.2 Integrace přístupu Lean Manufacturing do konceptu Six Sigma

Six Sigma je účinný přístup pro neustálé zlepšování podnikových procesů, a to jak v provozu, tak i ve zpracovatelském průmyslu, a metodika DMAIC se jeví tak efektivní, že se stal průmyslovým standardem pro zlepšení kvality. [9]

### 1.2.1 DMAIC

Přístup DMAIC (**Obr. 1- 1**) je základní součástí metodiky Six Sigma a široce používaný systém v mnoha špičkových firmách po celém světě. DMAIC poskytuje systematický postup, jak přistupovat k problému. Hlavní myšlenkou této metodické struktury ve snaze vyřešit daný problém je vyhnout se možnosti přeskokování jednotlivých kroků, které mohou vést ke špatnému řešení. [10]



Obr. 1- 1 DMAIC I

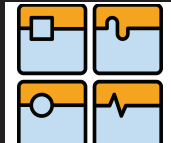
DMAIC znamená definovat, hodnotit, analyzovat, zlepšit a řídit. Za účelem zlepšení těchto procesů je zapotřebí vytrvalého naplňování závazku, vycházejícího ze základních požadavků vyplývajících z uvědomělého dodržování zvoleného postupu, celé organizace, především vyššího managementu. [10, 11]

Podstatou metody je pět základních kroků, jejichž počáteční písmena tvoří zkratku DMAIC (obr. 1). Každý z těchto postupů je významnou funkcí příslušného kroku.[10]

#### D jako Define (definovat)

„V čem je problém?“

Definování potřeb zákazníků, specifikování cíle, kterého má být dosaženo a definování parametrů projektu. „Define“ je prvním krokem této metody, kde je třeba

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

definovat konkrétní cíle pro dosažení výsledků, které jsou v souladu s obchodní strategií a potřebami zákazníků. [10, 11]

#### M jako Measure (měřit)

*„Jaká je požadovaná způsobilost procesu?“*

Shromažďování přesných údajů, které měří výkonnost a identifikují oblasti pokroku. V této fázi dochází i k ocenění současné výkonnosti podniku a její variace. [10, 11]

#### A jako Analyze (analyzovat)

*„Kdy, kde a jak se mohou příslušné vady vyskytnout?“*

Shromažďování přesných údajů, které měří výkonnost a identifikují oblasti pokroku. V této fázi dochází i k ocenění současné výkonnosti podniku a její variace.

Využití analytických a statistických nástrojů k identifikaci příčin problémů. V této fázi vývoje této metody, je třeba chápat problémy, aby mohla být později zformulována možná řešení, která by mohla zaplnit mezeru mezi současnou situací a představami klienta. [10, 11]

#### I jako Improve (zlepšit)

*„Jaká jsou řešení pro případná zlepšení a jak je uvést do praxe s cílem dosáhnout výkonnostních záměrů?“*

Identifikace a implementace řešení v takovém rozsahu, aby se zabránilo výše uvedeným problémům. Jedná se o velmi důležitý krok, který může být prováděn na několika úrovních a v několika opakováních, aby zajistil co nejlepší možné řešení s cílem ušetřit čas na testování a ověřování nejpříjemnějšího řešení. [10, 11]

#### C jako Control (řídit)

*„Jak kontrolovat klíčové proměnné tak, aby byly udrženy a zachovány výhody?“*

Posledním bodem této metodiky je právě kontrola, která je v návaznosti na navrhovaná řešení nastavena. Je důležité, aby se zabránilo případné regresi. Na druhou stranu, výsledky nejsou vždy okamžitě viditelné. Úsilí o dosažení co možná nejlepšího výsledku musí být zachováno, nebo dokonce zintenzivněno. [10, 11]

V případě, že očekávané výsledky nekorespondují s požadavky, dochází k opakování cyklu DMAIC, dokud není dosaženo předpokládaného výsledku.

### 1.2.2 Nástroje DMAIC

Ačkoliv metodologie Six Sigma je považována za klíč k řešení problémů dnešních firem a zlepšování dopadu jednotlivých defektů, je rozumné mít nějaký vhodný iterační přístup k dosažení těchto cílů. V současné době je na trhu k dispozici značné množství nástrojů a technik pro efektivní výsledky v podnikání. I když celá struktura metodiky DMAIC (Tab. 1- 1) spolu navzájem souvisí a navazuje na sebe, v určitém okamžiku se může stát, že určitá fáze nedovoluje získat dostatek údajů, které pomohou vyřešit jádro problému. Právě v takovém případě lze ocenit vhodnou iterační metodu, která kdykoli umožňuje návrat zpět do fáze předchozí a shromáždit relevantní údaje pro správné srovnání a výsledek. Tyto nástroje a techniky pomáhají v kritických situacích v každé fázi a přinesou efektivní výsledky. [12, 13]

### 1.3 Design For Six Sigma (DFSS)

Design For Six Sigma (DFSS) je přístup, který rozšiřuje koncept procesu zlepšování Six Sigma tak, že se snaží dát dohromady návrh nových výrobků a služeb, či re-design stávajících produktů spolu s pečlivým řešením podpůrných procesů, které dodávají tyto produkty a služby na trh. I přesto, že mnoho dnešních přístupů založených na metodologii DFSS podporuje přísné konstrukční návrhy se silnějším zaměřením na koncového zákazníka, chybí vize a integrace s úspěšnými podnikovými procesy a ochota zavedení něčeho "nového". [9]

#### 1.3.1 DMADV

DMADV je velmi efektivní způsob, jak vytvořit nový produkt nebo nový proces. Metodika DMADV nelze lépe vysvětlit než srovnáním s metodikou DMAIC s ohledem na jejich zásadní rozdíly. Podobnost těchto dvou metod končí po třetí fázi obou procesů a to fázi "Analyze".

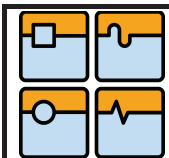
#### D jako Design (konstruovat)

*"Které požadavky zákazníka mají být dosaženy?"*

V této fázi je navrženo množství alternativních postupů k dosažení přání a potřeb koncových zákazníků. Na tyto procesy se pak nahlíží jako na přípustná řešení, z kterých je potřeba vybrat to, které nejvíce odpovídá požadavkům zákazníka. [14]

#### V jako Verify (ověřit)

*"Které požadavky jsou uspokojovány lépe?"*



DMADV používá objektivní prohlášení k ověření skutečnosti, zda potřeby a přání zákazníků jsou uspokojovány dle vytyčených cílů a předpokladů. Jednotlivá měření jsou pak srovnávána s předchozími měřeními za účelem zjištění, zda došlo ke zlepšení a jestli se firma ubírá správným směrem. [14]

Tab. 1- 1 Nástroje DMAIC

DMAIC Fáze	Použitý nástroj
<b>D - "Define" fáze</b>	
Definování požadavků a zákazníků (CTQ)	Projektová listina
Stanovení problémových cílů, prohlášení a benefitů	Procesní vývojový diagram
Definování zdrojů	Analýza zájmové strany
Identifikování týmu a zodpovědné osoby	SIPOC diagram
Zhodnocení klíčové organizační podpory	DMAIC struktura rozpisu práce
Rozvoj procesní mapy na vysoké úrovni	Hlas zákazníka (VOC)
Vypracování plánů projektu a mezníků	Kritické požadavky jakosti (CTQ)
<b>DMAIC Fáze</b>	
<b>M - "Measure" fáze</b>	
Definování závady, oddělení, metrik a příležitostí	Procesní vývojový diagram
Podrobná procesní mapa příslušné oblasti	Sběr dat
Vypracování plánu pro sběr dat	Benchmarking
Ověření systému měření	Analýza systému měření a analýza R & R
Sběr dat	Hlas zákazníka (VOC)
Určení způsobilosti procesu a Sigma základní čáry	Výpočet procesu Six Sigma
<b>DMAIC Fáze</b>	
<b>A - "Analyze" fáze</b>	
Definování výkonnostních cílů	Histogram
Identifikování zdrojů variability	Paretova analýza
Určení hodnoty přidáných procesních kroků	Rozptylový diagram (Scatter Plot)
Určení základní příčiny(y)	Časové řady/Průběhový diagram
Zjištění hodnoty náhodné veličiny a její vztah x's,	Regresní analýza
<b>DMAIC Fáze</b>	
<b>I - "Improve" fáze</b>	
Provedení plánovaného experimentu	Brainstorming
Rozvíjení možných řešení	Prevence detekce
Posouzení spolehlivosti jednotlivých možných	Pugh matice
Define Operating Tolerances of Potential System	DOE
Ověření možného zlepšení prvotního návrhu	Dům kvality
Upravení / přehodnocení potenciálního řešení	FMEA
<b>DMAIC Fáze</b>	
<b>C - "Control" fáze</b>	
Definování a ověření monitorovacího a řídicího	Výpočet procesu Six Sigma
Rozvíjení standardů a postupů	Kontrolní tabulky
Implementování statistické procesní kontroly	Úspory nákladů a výpočty
Rozvíjení dodacího plánu, předávka vlastníkovi	Kontrolní plán

### 1.3.2 DMAIC vs. DMADV

I když DMAIC a DMADV jsou určeny pro různé pracovní procesy, i tak mají tyto metodiky některé základní podobnosti:

- snížení počtu závad na méně než 3,4 na milion příležitostí, které mohou nastat,
- užití fakt a statistických nástrojů pro hledání řešení problémů týkajících se jakosti,

- soustředění na dosažení finančních a obchodních cílů organizace,
- nutnost podpory zodpovědné osoby dohlížející na daný proces. [14]

Obě metody mohou sdílet první písmena charakteristických fází, ale tímhle vzájemná podobnost končí. Hlavní rozdíly vymezující jejich typické vlastnosti jsou následující:

- DMAIC je spojena s definicí podnikových procesů a jejich použitelnosti, zatímco DMADV pomáhá při definování potřeb zákazníků ve vztahu k výrobku nebo službě.
- DMAIC se používá pro měření aktuální výkonnosti podnikových procesů a namísto toho DMADV se používá pro měření potřeb a požadavků zákazníka.
- V DMAIC jsou podnikové procesy analyzovány za účelem stanovení kořenové příčiny závady nebo opakující se problém. V DMADV jsou podnikové procesy analyzovány k zjištění možností, které pomohou při uspokojování přání a potřeb zákazníka.
- V DMAIC jsou zlepšení v podnikových procesech realizována pro odstranění nebo redukování vady, zatímco v DMADV je navržen vhodný podnikový model, který pomáhá při plnění požadavků zákazníka.
- V DMAIC jsou zavedeny řídicí systémy, aby dohlížely na budoucí výkonnost podnikových procesů. V DMADV je navrhovaný podnikový model podroben simulačním testům pro ověření účinnosti při dosahování a plnění přání a potřeb zákazníka. [14]

Výše uvedeným porovnáním jednotlivých metod lze dojít k závěru, že DMAIC se používá u procesů nebo produktů, které již existují, ale nejsou schopny plnit přání a požadavky zákazníka. Naproti tomu metoda DMADV je vhodná pro nový výrobek nebo proces, který musí být vyvinut právě tak, aby byl schopen dostát přáním a požadavkům koncového zákazníka. DMADV může být také použit pro optimalizaci již stávajícího produktu nebo procesu tak, aby byl schopen plnit potřeby a přání zákazníků nebo dosáhnout úrovně Six Sigma. [14]

## 1.4 Honeywell Technology Solution Brno

Firma Honeywell je synonymem nadnárodní společnosti patřící do žebříčku stovky společností zabývajících se návrhem a realizací technologií pro řešení náročných úkolů spojených s nejmodernějšími trendy, jako jsou bezpečnost, spolehlivost a energie. S přibližně 122 000 zaměstnanců po celém světě v čele s více jak 19 000 inženýrů a vědců se firma zaměřuje na neustále se zlepšující kvalitu, dodávky, hodnoty a technologie ve všech odvětvích jejího působení. [15]

Na globální úrovni se Honeywell realizuje v následujících oblastech průmyslu (**Obr. 1- 2**):

- letecký a obranný průmysl,



# DIPLOMOVÁ PRÁCE

- automobilový průmysl a doprava,
- budovy, stavby a údržba,
- chemikálie, speciální materiály a hnojiva,
- spotřebitelé a domácnost,
- technologie řízení pro domov, budovy a průmysl,
- požární ochrana,
- zdravotní péče a lékařství,
- řízení průmyslových procesů,
- petrochemie a biopaliva,
- bezpečnost a zabezpečení,
- ... [15]



### Obr. 1- 2 Portfolio firmy Honeywell

V lednu 2003 se společnost Honeywell zasloužila o vznik integrovaného Design Centra (IDC (Honeywell Technology Solution)) v Brně. Po dvou úspěšných letech se stala součástí korporace IDC (HTS), jako IDC (HTS) – Brno. IDC (HTS) – Brno přináší výsledky v oblasti automatizace a řízení (Automation and Control Solutions (ACS)). Dále se soustředí na technologie řízení pro domov, budovy a průmysl, např. termostaty, poháněcí zařízení, ventily, řešení pro bezpečnostní systémy apod. V oblasti leteckého průmyslu (Aero) se HTS Brno věnuje softwarovému řešení palubních displejů, systémů řízení letu, verifikaci a validaci pomocí matematického modelování, funkční kontrole a analýze jeho součástí. Honeywell Turbo Technologies (HTT) je poslední součástí brněnské pobočky společnosti. [15, 16]

HTT jako jednotka HTS – Brno (**Obr. 1- 3**) je jednou ze čtyř hlavních divizí v rámci společnosti a je uznávána po celém světě jako jeden z předních výrobců přeplňovaných systémů motoru osobních automobilů i užitkových vozidel. V oblasti automobilového průmyslu a dopravy je klíčovým objektem zájmu moderní automobilové technologie v popředí s vývojem a konstrukcí turbodmychadel. Turbodmychadla však nejsou jediným



zájmem společnosti v oblasti moderních automobilových technologií. Je třeba také upozornit na výrobu brzdových destiček, chladičů, vestavěných senzorů, vypínačů a ovládacích prvků a v neposlední řadě také testovacích a měřicích senzorů. [15, 16]



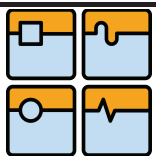
Obr. 1- 3 Portfolio HTS

## 1.5 Přepřňované motory

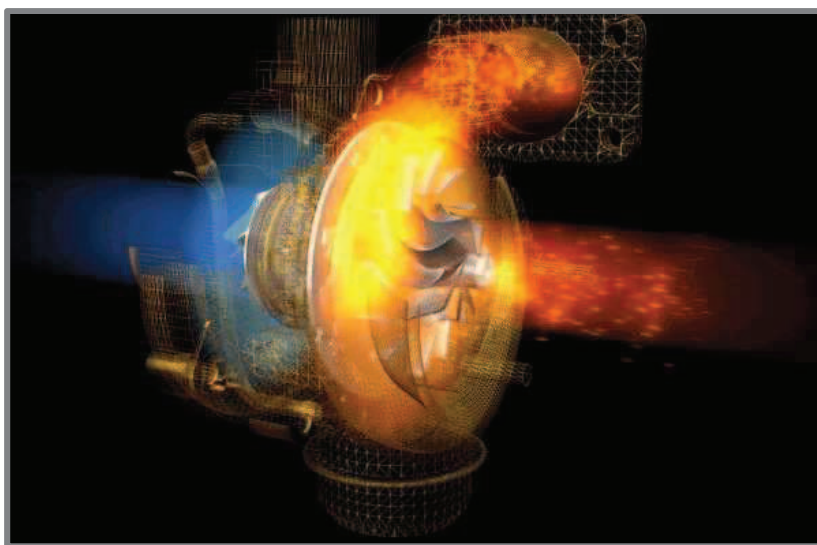
Budoucnost patří přepřňování! Nejenom z důvodu zvýšeného přívodu množství vzduchu a tím i dodávky paliva do spalovacího prostoru, ani ne kvůli vyššímu točivému momentu a výkonu u objemově srovnatelných motorů, nikoli jen kvůli nižší měrné spotřebě a výkonové hmotnosti, ale především díky svému velkému potenciálu, který postupně odkrývají. [1, 3]

Přepřňování nabízí elegantní řešení jedné zásadní nevýhody spalovacího motoru, kterou jsou nízké hodnoty točivého momentu při nízkých, v praxi nejčastěji používaných, otáčkách motoru. Proto se nejvyšší účinek přepřňování umísřuje zpravidla do nízkých otáček, aby byla tato nevýhoda odstraněna nebo alespoň omezena. Bohužel i zde čeká na motoráře řada úskalí. Zvýšení plnicích tlaků znamená také vyšší maximální tlaky ve spalovacím prostoru a tedy i větší zatížení pro klikový hřidel a jeho ložiska nebo samotný píst. Limitem stlačení směsi ve válci (tj. kompresního poměru) spalovacího motoru je u benzínových motorů také tzv. klepání motoru neboli neřizené samozápaly. I tyto problémy však mají řešení. Optimální využití oktanového potenciálu paliva dnes řeší řídící jednotka například řízením předstihu zážehu motoru, který bývá podstatně zmenšen proti atmosférickým motorům. [2]

V neposlední řadě dělají inženýrům starosti vysoké teploty výfukových plynů na výstupu z motoru (proto se při maximálních zatíženích aplikuje bohatá směs, která výfukové



plyny ochlazuje za cenu zvýšené spotřeby paliva), (**Obr. 1- 4**). Omezení teplot musí být provedeno s ohledem na životnost turbíny (u přeplňování turbodmychadlem) i správnou funkci katalyzátoru. I na druhé straně motoru- v sání – jde o teploty. Cílem je dostat do válce maximum vzduchu, jehož hustota se zvyšuje s klesající teplotou. Proto je dmychadlem stlačený (a tím i zahřátý) vzduch ještě před vstupem do válce ochlazen v mezichladiči. Teplota stlačeného vzduchu na výstupu z mezichladiče dosahuje přibližně teploty původně nasátého vzduchu. [2]



**Obr. 1- 4** Tepelný oběh turbodmychadla

Současný rozruch ve světě automobilového průmyslu se točí kolem alternativních pohonů vozidel. Zatímco veřejné diskuze o směřování průmyslu vedou k elektrickému a hybridnímu pohonu vozidel, tak výrobci osobních a užitkových automobilů se zaměřují především na snižování zdvihového objemu spalovacích motorů tzv. downsizingu k zajištění nízké spotřeby a plnění přísných požadavků US CAFE standardů a nařízení Evropské unie v oblasti regulace emisí CO<sub>2</sub> u osobních a užitkových automobilů. [17]

Přeplňování je nejdostupnější "zelenou" technologii, která je dnes k dispozici, neboť právě ona při tzv. downsizingu (zmenšování) motoru zvyšuje efektivní účinnost, aniž by docházelo k degradaci výkonu motoru a požitku z jízdy. Turbo motory ve srovnání se stejně výkonnými atmosférickými motory nabízí až o 20% nižší spotřebu paliva u vozidel s benzínovým motorem a až 40% u motorů dieselových. [17]

### 1.5.1 Turbodmychadla

Turbodmychadlo neboli turbo je speciální typ vzduchového kompresoru poháněného výfukovými plyny, jehož pohonnou jednotku tvoří turbína. Turbodmychadlo se skládá ze tří hlavních částí: kompresorové sloužící k nasávání čerstvého vzduchu, jeho stlačení a dodávce

do spalovacího prostoru, turbínové zajišťující pohon turbodmychadla a ložiskové zabezpečující uložení, chlazení a mazání rotačních skupin. [18, 19]

### Části a materiál turbodmychadla

- turbínová skříň

Hlavní úlohou turbínové skříně (**Obr. 1- 5**) je nést funkční celky a zajistit jejich správnou funkci za provozu. Z tohoto důvodu jsou kladeny na konstrukci turbínových skříní vysoké požadavky, a to především nároky na pevnost, nosnost, odolnost proti teplotě a vibracím. Kromě nosné funkce plní skříň také funkci rozváděcí, přičemž přivádí výfukové plyny z motoru pro turbínu. [20, 21]



**Obr. 1- 5** Turbínová skříň

Velmi důležitou funkcí z hlediska bezpečnosti je schopnost turbínové skříně v případě poruchy chránit okolní stroje, zařízení nebo lidské životy. Vzhledem k vysokým kinetickým energiím, jakých rotor turbodmychadla nabývá, totiž dochází při poškození k porušení jeho vyváženého stavu a následnému utržení. Skříň proto musí utržený rotor, či jeho části, zadržet a zabránit tak vzniku dalších škod. Její pevnost se ověřuje nejen výpočty, ale i zkouškami, kdy se do provozu uvede záměrně specificky poškozené turbodmychadlo. [20, 21]

Technologií pro výrobu turbínových skříní je odlévání. Turbínové skříně použité u turbodmychadel pracujících za nižších provozních teplot (např. dieselové motory) jsou odlévány z tvárné litiny. Naproti tomu turbínové skříně používané u turbodmychadel za vyšších teplot jsou vyrobeny z vysokoteplotních materiálů. [20, 21]

Skříň také slouží k upevnění turbodmychadla. Požadavky se liší podle velikosti a hmotnosti. Nejsilnějším parazitním vlivem na upevnění jsou vibrace, při návrhu uchycení je nutné na ně brát zřetel. [20, 21]

- kompresorová skříň

Kompresorová skříň (**Obr. 1- 6**) je na rozdíl od turbínové vyráběna ze slitin hliníku, pokud ovšem není turbodmychadlo použito pro větší motory s vyšším stlačením. V tomto případě je použitým materiálem tvárná litina, která má vyšší pevnost v tahu. [21]



**Obr. 1- 6** Kompresorová skříň

Princip kompresorové skříně je obdobný, jak je tomu u skříně turbínové, avšak s tím rozdílem, že kompresorová skříň se stará o správné nasměrování vzduchu na kompresorové kolo a stlačování vzduchu. [21]

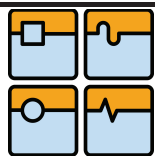
V kompresorové skříně je uloženo kompresorové kolo nasávající vzduch, který po stlačení v oběžném kole dále směřuje na difuzor a přes difuzor odchází spirálově stočenou skříní (rozšiřující se směrem od středu) do plnicího potrubí a dále pak do prostoru válců spalovacího motoru. Úlohou difuzoru je zpomalování proudu vzduchu (tedy přeměna kinetické energie proudu na mechanickou) beze ztrát, čímž lze získat větší plnicí tlak. [20, 21]

- rotační skupina

Rotační skupina (**Obr. 1- 7**) turbodmychadla představuje pojem seskupující turbínové kolo, hřídel turbínového kola a kolo kompresorové. Turbínové kolo bývá k hřídeli nejčastěji přivařeno třením nebo elektronovým paprskem. Materiálem většinou bývá kvalitní ocel. [20, 21]

Celá rotační skupina je vystavena vysokým obvodovým rychlostem a tudíž i odstředivým silám, které jsou tlumeny v ložiscích. [21]

Na rotační skupinu jsou kladeny vysoké požadavky z důvodu zajištění dynamické rovnováhy. Při sestavování celé rotační skupiny je nutné její vyvážení na vyvažovacím



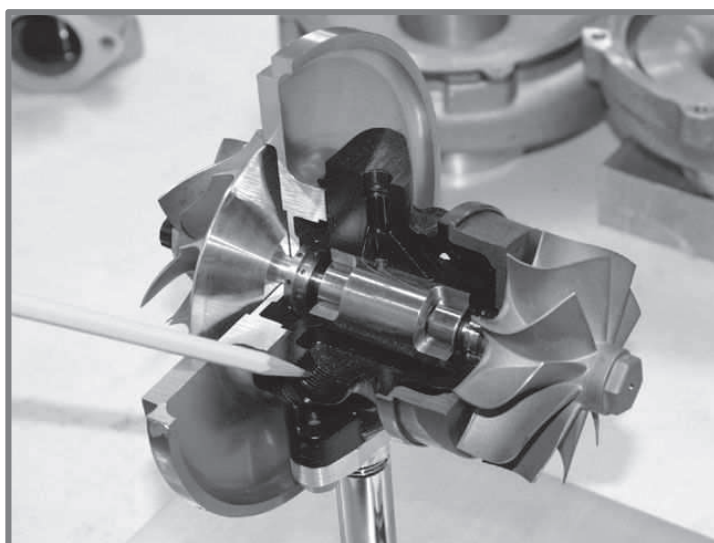
zařízení, kde se případná nerovnováha řeší úběrem materiálu z kompresorového příp. turbínového kola. [20, 21]



Obr. 1- 7 Rotační skupina

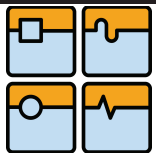
- ložisková skříň

Primární funkcí ložiskové skříně (**Obr. 1- 8**) je její mazací a chladicí schopnost a zároveň udržuje rotační skupinu v dynamické rovnováze. Prostřednictvím ložisek (kluzná nebo kuličková) je v ložiskové skříni uložena hřídel, která spojuje kompresorové a turbínové kolo na jednotlivých stranách turbodmychadla. Vzhledem k vysoké rychlosti otáčení vzniká extrémní teplo v nábojích ložisek, a proto je u turbodmychadel pracujících za vysokých teplot nutné neustálé chlazení pomocí vody, vody a oleje nebo jen oleje. [20, 21]



Obr. 1- 8 Ložisková skříň s rotační skupinou





K ložiskové skříni je připojena turbínová a kompresorová skříň a z hlediska bezpečnosti zde platí obdobné požadavky, jako je tomu u výše zmiňovaných skříní.

- turbínové kolo

Turbínové kolo (**Obr. 1- 9**) přeměňuje tepelnou energii spalín na kinetickou energii kompresorového kola. Nejčastěji jsou vyráběna odléváním metodou vytavitelného modelu ze speciálních vysokoteplotních slitin. [20, 21]



Obr. 1- 9 Turbínové kolo

- kompresorové kolo

Úlohou kompresorového kola (**Obr. 1- 10**) je axiální nasávání vzduchu z okolí, který je kompresorovým kolem dále urychlován a následně prohnán difuzorem, kde je při zvýšení



Obr. 1- 10 Kompresorové kolo

tlaku a teploty zpomalen a přes spirální část skříně odveden dál směrem k motoru. Jeho tvar a velikost vychází z výpočtů s ohledem na požadované stlačení. [20, 21]

Kompresorové kolo u malých turbodmychadel bývá vyráběno odléváním slitin hliníku. Nejčastější metodou je odlévání s vytavitelným modelem. U větších turbodmychadel se kompresorová kola zhotovují jako výkovky, kde dochází ke zpevnění materiálu a kola tak mohou pracovat za větších stlačení. Lopatky takto vyrobených kol se následně frézují. [20, 21]

### 1.5.2 Regulace přepřňovaných motorů

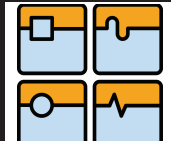
Všem způsobům přepřňování je společné to, že je potřeba omezovat velikost plnicího tlaku s rostoucími otáčkami motoru. Nevýhodou spalovacích motorů jsou nízké hodnoty točivého momentu při nízkých (v praxi nejčastěji používaných) otáčkách motoru. Aby byla tato nevýhoda odstraněna nebo alespoň omezena je snahou umisťovat maximální účinek přepřňování do nízkých otáček. Avšak při tomto dimenzování dmyhadla by další zvyšování otáček motoru znamenalo vyšší otáčky dmyhadla a tedy i vyšší plnicí tlaky, které by nadměrně zatěžovaly celý motor, a jeho životnost by se tedy velmi snížila. Proto se do systému přepřňování řadí obtokový ventil („waste-gate“) nebo proměnná geometrie lopatek turbíny (zatím u vznětových motorů, vzhledem k nižším teplotám výfukových plynů), případně jejich kombinace. [2, 22]

- **regulace tlaku pomocí „waste-gatu“**

Waste-gate (**Obr. 1- 11**) neboli paralelní obtokový ventil výfukových plynů slouží k regulaci plnicího tlaku, zejména ve vysokých otáčkách motoru. Je to z toho důvodu, že moderní přepřňované motory mají maximum svého točivého momentu motoru posazeno do



**Obr. 1- 11** Turbodmychadlo s regulací pomocí waste-gatu

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 32
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

nízkých otáček (cca 2000 ot/min) a aby bylo tohoto požadavku dosaženo, bývá turbodmychadlo dimenzováno pro malé hmotnostní toky výfukových plynů, odpovídající nízkým otáčkám. [22, 23, 24]

S vyššími otáčkami a zatíženími však dochází k nežádoucímu nárůstu plnicího tlaku, který je potřeba omezit. Dříve méně elegantní řešení pomocí odpouštění stačeného vzduchu ze sání, je v dnešní době nahrazováno odváděním přebytečného toku výfukových plynů při vyšších otáčkách motoru paralelním obtokovým kanálem neboli waste-gatem, který bývá většinou zabudován do tělesa turbodmychadla. Jeho otevírání se řídí tlakem v sacím potrubí a i do této oblasti zasahuje elektronika. [22, 23]

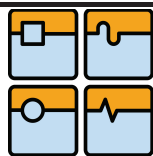
Waste-gate je otevírán prostřednictvím elektromagnetického ventilu, který dostává informace z elektronické řídicí jednotky motoru, která vyhodnocuje signály snímačů natočení škrticí klapky, klepání motoru, předstihu zážehu, množství a teploty nasávaného vzduchu (a mnohých dalších) a srovnává aktuální stav s polem charakteristik uloženým v řídicí jednotce motoru. Případné odchylky odstraňuje vhodným regulačním zásahem změnou polohy obtokového ventilu. V kombinaci s regulací klepání motoru jsou získávány nejen požadované dynamické vlastnosti motoru, ale na vhodné (nízké) hodnotě je udržována teplota výfukových plynů. Použitím snímače absolutního tlaku může být regulována hodnota plnicího tlaku nezávisle na tlaku okolního vzduchu, čímž se koriguje nižší atmosférický tlak ve vyšších nadmořských výškách. [22]

Uvedený způsob regulace předpokládá, že turbodmychadlo je udržováno ve vyšších vlastních otáčkách v celém otáčkovém spektru motoru. Dávkování výkonu se řídí otevíráním škrticí klapky motoru (obtokový ventil se přizpůsobuje, nejdříve je zavřený a postupně s rostoucími otáčkami se otevírá). Výhodou tohoto řešení je velmi rychlá odezva na sešlápnutí pedálu akcelérátoru. Nevýhodou je větší protitlak ve výfukovém potrubí, protože roztočené turbo vlastně brání vyprazdňování válce motoru, tedy větší mechanické ztráty a větší spotřeba. [22]

Druhým extrémem z hlediska dynamické odezvy motoru je situace, kdy je zpočátku obtokový ventil plně otevřen (a postupně se uzavírá), turbodmychadlo se sice otáčí, ale jen relativně nízkými otáčkami (bez výrazného nárůstu plnicího tlaku) a teprve po sešlápnutí pedálu akcelérátoru se turbo začíná urychlovat a dodávat požadovaný plnicí tlak. Výhodou tohoto řešení je nižší protitlak ve výfukovém potrubí, nižší mechanické ztráty, nižší spotřeba. Nevýhodou pak delší čas potřebný pro roztočení turbodmychadla, tedy známý turbo-efekt. [22]

Výše popsáný způsob představuje interní regulaci přeplňovaných motorů. Správné naladění turbodmychadla je stále jeden z největších oříšků konstrukce motoru a také zde v posledních letech výrazně pomáhají počítačové simulace, které umožňují s velkou přesností předpovědět, jak se bude reálný motor chovat v provozu, aniž by se cokoli vyrobilo. [22, 25]





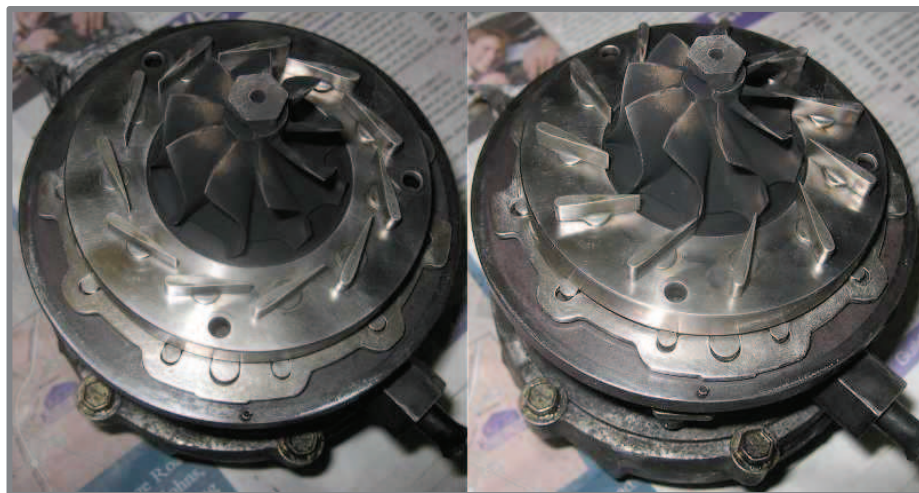
- **regulace tlaku pomocí proměnné geometrie rozváděcích lopatek turbíny (VNT)**

Turbodmychadla s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny (VNT) (**Obr. 1-12**) pracují na principu plynulé změny průtoku výfukových plynů turbínovou skříní s cílem optimalizovat výkon turbíny s požadovanou rychlostí proudění. [26]

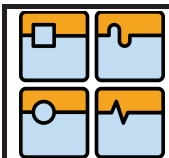


**Obr. 1- 12** Turbodmychadla s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny (VNT)

VNT mechanismus se skládá z množství lopatek rozmístěných po obvodu turbínového kola a jejich natáčením tak umožňuje změnu výstupního průtočného průřezu plynů na výstupu z turbíny. Turbínu je nutné navrhnout na maximální hmotnostní tok, aby při plném otevření nedocházelo k překročení maximálního plnicího tlaku. Dále je nutné klást vysoký důraz na geometrii rozváděcích lopatek, které se na rozdíl od turbíny dimenzují na hmotnostní tok odpovídající přibližně středu regulované oblasti. Natočení rozváděcích lopatek způsobí změnu



**Obr. 1- 13** VNT mechanismus s uzavřenými (vlevo) a otevřenými lopatkami



průtočného průřezu statoru. Mění se úhel a velikost absolutní rychlosti výfukových plynů proudících na turbínu, která má však stále stejnou průtočnou plochu. [26, 27]

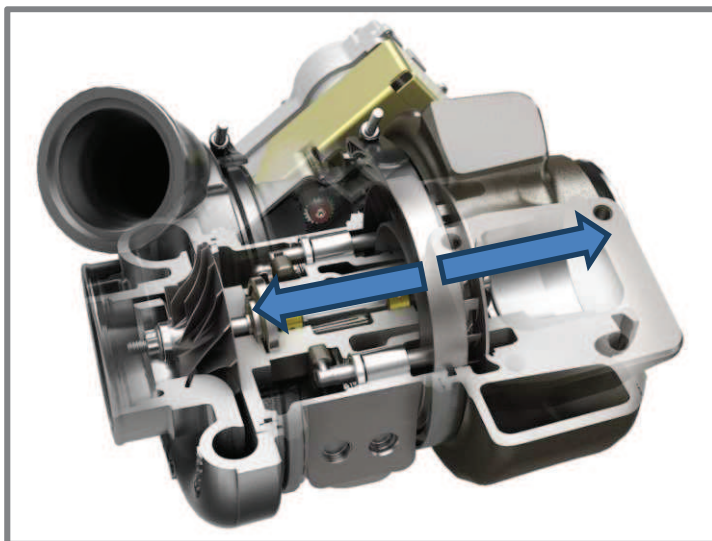
Při nízkých otáčkách motoru a malém průtoku plynů je zapotřebí vysokých otáček turbodmychadla. Dochází tedy k redukci příčného průřezu průtoku těchto plynů a tím ke zvýšení výkonu turbíny a tím ke zvýšení plnicího tlaku. Lopatky statoru se tedy nastaví tak, aby průtočná plocha mezi nimi byla co nejmenší. Naopak při plné rychlosti a vysokém průtoku plynů, VNT zvyšuje průřez průtoku plynů, aby se dosáhlo nižšího tlaku výfukových plynů a zabránilo se tak překročení maximální obvodové rychlosti turbodmychadla a tím byl zaručen požadovaný plnicí tlak vzduchu. Průtočná plocha mezi lopatkami tak musí být co největší (**Obr. 1- 13**). [26, 27]

Velkou výhodou oproti regulaci pomocí waste-gatu je fakt, že se jedná v podstatě o bez ztrátovou regulaci, při které nedochází ke hromadění výfukových plynů před turbínou, čili jejich tlak i teplota mají podstatně nižší hodnotu než při odpouštění výfukových plynů. [26, 27]

- **regulace tlaku pomocí proměnné šířky statoru turbíny (VGT)**

Turbodmychadlo s proměnnou šířkou statoru turbíny ((VGT), **Obr. 1- 14**) pracuje na obdobném principu regulace jako turbodmychadlo s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny. Podstatným rozdílem je, že VGT mechanismus se sestává z axiálně posuvného rozváděcího kola spojeného s kompresorem, přičemž rozváděcí lopatky umístěné opět po obvodu jsou s rozváděcím kolem spojeny pevně (neotočně). [26, 27]

Celé rozváděcí kolo se axiálně posouvá v prostoru turbíny, a tím se současně lopatky zasouvají do prstence v protilehlé stěně, ve které jsou otvory ve tvaru lopatek. Pro ovládání tohoto axiálního posuvu není použito membrány napojené na výstupní tlak z kompresoru.



**Obr. 1- 14** Turbodmychadlo s proměnnou šířkou statoru turbíny (VGT)

Místo ní se používá pístu, který se pohybuje vlivem tlaku vzduchu z brzdového systému automobilu. Snímání tlaku plnicího vzduchu je realizováno bezdotykovým snímáním otáček turbodmychadla magnetickým snímačem, který je umístěný v ložiskové skříni uprostřed rotoru. [26, 27]

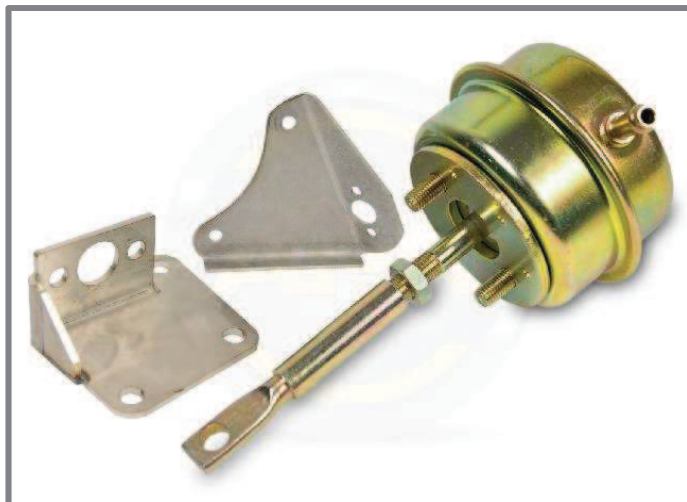
Ve srovnání s předchozími uvedenými způsoby regulace lze mechanismus VGT vyzvednout z důvodu, že turbínou prochází celý hmotnostní tok výfukových plynů a tím je možné využít co nejvíce energie. Rozváděcí lopatky jsou nepohyblivé a nastaveny tak, aby vytvářely ideální úhel náběhu proudu na oběžné kolo v celém rozsahu regulace (u VNT se tento úhel mění s natočením lopatek). [26, 27]

Existují i další druhy regulací přeplňovaných motorů. Jen pro doplnění je možné zmínit třeba regulaci plnicího tlaku řídicí směrovou klapkou, kombinovanou regulaci (regulace tlaku směrovou klapkou doplněna o regulaci tlaku pomocí paralelního obtokového ventilu (waste-gatu), popř. turbodmychadla s elektrickým pohonem, dvoustupňové regulované přeplňování nebo systém zdvojeného přeplňování. [26, 27]

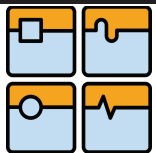
### 1.5.3 Ovládací prvky pro WG a VNT regulační systémy

- **aktuátory**

Aktuátory patřily mezi první regulační systémy, které byly implementovány na okruh waste-gate za účelem jeho regulace. Prvek aktuátoru představuje svým způsobem jednoduchý kinematický mechanismus s velkým potenciálem na rozličné využití regulace. Aktuátory se postupně rozšířily i na regulaci VNT systémů malých turbodmychadel. Tato sofistikovaná zařízení jsou založena na jedné základní myšlence, vzduchové regulaci z vlastního okruhu turbodmychadla. Jsou řízena buď podtlakem, nebo i přetlakem vzduchu. [28]



Obr. 1- 15 Pneumatický přetlakový aktuátor



Přetlakový aktuátor (**Obr. 1- 15**) se skládá ze dvou komor oddělených membránou. Se zvyšujícími se otáčkami motoru a turbodmychadla dochází k nárůstu plnicího tlaku a ten je řídicím tlakem pro aktuátor. Proti tlaku působí síla pružiny (**Obr. 1- 16**), která musí být dimenzovaná proti vysokému tlaku na výstupu z kompresoru. Nejčastěji se používá při ovládání obtokového ventilu turbodmychadla. Teplotní odolnost aktuátoru se pohybuje kolem 150 °C. Životnost by měla překročit 1 mil. cyklů. Reakce aktuátoru se pohybuje v rozmezí 150 – 700 m/s. [28, 29]



Obr. 1- 16 Řez přetlakových aktuátorem

Naproti tomu podtlakový aktuátor se skládá ze dvou komor, z nichž jedna je vakuová. Atmosférický tlak působí na spodní straně membrány. Pružiny použité u tohoto typu aktuátoru mohou být měkčí, protože podtlak, který je vyvíjen vývěvou, není tak velký jako tlak používaný při tlakovém aktuátoru. [28, 29]

Aktuátory v oblasti testování turbodmychadel se užívají jednak jako regulační členy přímo pro termodynamický cyklus turbodmychadla, ale také, a to hlavně, jako regulační simulátor pro vyvození různých zátěžných cyklů představujících nárazová proudění turbínovou skříní. V praxi se setkáváme v podstatě s převahou přetlakem ovládaných aktuátorů WG+ (waste-gate řízený přetlakem), což pro simulaci zmíněných cyklických změn je z hlediska celkové účinnosti obvodu nejspolehlivější. Přetlakem ovládaný okruh není tolik náchylný na netěsnosti [28]

#### ▪ REA / SREA systémy regulace

REA (elektronicky řízený aktuátor s rotačním mechanismem) či SREA (elektronicky řízený aktuátor s rotačním mechanismem a zpětnovazebním řízením) systémy umožnily opět vysoký nárůst přesnosti a efektivity regulace turbodmychadel. Tyto mechanické systémy s poměrně rozsáhlou regulační elektronikou daly nový rozměr pro vývoj zpracování signálu jak příchozího, tedy přímo regulačního, tak i odezvy na dané nastavení. Systém umožňuje přesnou korekci cyklicky pro danou regulaci. REA systémy obecně byly aplikovány na různé typy turbodmychadel, od běžných pro spalovací motory automobilů, tak pro speciální systémy přepřehování určených pro nákladní automobily či těžební stroje. [28]



Významnou roli tento systém našel v motorsportu. REA mechanika je založena na stejnosměrném krokovém motoru tzv. DC (Direct current) motoru, zaměřeném na přímou a přesnou aretaci polohy. DC motor byl užit z důvodu malých zástavbových rozměrů, poměru sil vyvozených na ovládací mechanismus, nízkých provozních nákladů a také na základě praktických zkušeností v automobilovém průmyslu. Prvním designem užitým v REA systému byla kombinace DC motoru s nástrčným šroubem a potenciometrickým snímačem. Druhou vývojovou generací byla REA vybavená větším DC (DC motorem, vratnou pružinou (pro ustavení nulové polohy), rotačním výstupem pro ovládací mechanismus a standardním potenciometrickým snímačem. Zde vývoj samozřejmě nekončí, dnes se pracuje na mnohem sofistikovanějších zařízeních, která by zlepšila rychlost a přesnost regulace ale taktéž snížila výrobní náklady samotného systému. [28]


#### 1.5.4 Trendy ve spalovacích motorech

„Viděli jsme budoucnost – a je přepřelňovaná turbem. Vstupujeme do nového věku přepřelňování, který podle všeho zastíní vše, co bylo před ním. Zatím to byla tichá revoluce, ale pomalu začíná nabírat otáčky s exponenciálním zrychlením, trochu jako lopatky turbodmychadla. Během několika příštích let budou auta vybavená atmosférickými motory odsouzena stát se nepočtenou, staromilskou výjimkou. Turbo pochopitelně nikdy nezemřelo. Dokonce i když se přepřelňované benzínové motory dostaly na dno své popularity – zastíněny v té samé době rostoucí oblíbeností svých hrubějších bratranců, turbodieselů – některé automobilky v ně stále věřily. Spousta dalších byla ale šťastná, že se konečně mohla zbavit nespolehlivosti a nelineárního výkonu, tedy vlastností starých turbodmychadlových motorů ...“ [30]

Zatím to opravdu vypadá, že i blízká budoucnost v automobilovém průmyslu bude patřit přepřelňování, ale je nutné to zmínit s určitou mírou nadsázky.

Je pravdou, že světové automobilky slyší na téma „zelených“ technologií a snaží se do svých konceptů zahrnout i myšlenku elektrifikace automobilu, která se stává častým mediálním trhákem, nicméně realita je jiná. Technici a výzkumníci automobilek v oblasti pohonu, kteří dosud pracovali na vývoji spalovacího motoru, v žádném případě svoji práci jen tak neopustí. V boji se spotřebou a s emisemi CO<sub>2</sub> neřekl spalovací motor ještě zdaleka svoje poslední slovo. [31]

Kam tedy bude směřovat budoucnost přepřelňování? Pro výrazné navýšení výkonu malých motorů již dnes světoví výrobci automobilů volí dvojité přepřelňování kombinující mechanický kompresor s turbodmychadlem (např. zážehový motor koncernu VW 1.4 TSI, nebo dvoustupňové regulované přepřelňování (např. vznětový motor BMW) a dokonce se i spekuluje o přepřelňování třemi turbodmychadly (nové BMW X3 M). Dalším možným směrem přepřelňování je tzv. „downsizing“ neboli snižování velikosti motoru při zachování obdobných výkonových vlastností jako je tomu u motorů atmosférických. Až do extrému dovedli tento

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 38
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

vývojový směr (downsizing) u Fiatu, kde u nového zážehového motoru přešli až na dvouválec, jehož spotřeba se oproti srovnatelnému čtyřválcí snížila o 30 %, což znamená, že emise CO<sub>2</sub> jsou pouhých 95 g/km (spotřeba 4 l/100 km). [26, 32]

Avšak ani přední dodavatelé automobilového průmyslu nezůstávají pozadu a přispívají celou řadou moderních technických řešení, která postupně přicházejí do sériové výroby. Např. variabilní řízení ventilů s tvorbou směsi v závislosti na vyžadovaném provozu, volba vhodného přímého vstřiku paliva doplněného o ještě preciznější proces vstřiku, energeticky optimální řízení tepelného hospodářství, vysokotlakové přeplňování nebo přechodná aktivace pomocných agregátů atd. [26, 32]

Zásluhou těchto inovací je potlačení energetických ztrát, pokles spotřeby paliva a redukce škodlivin ve výfukových plynech (homogenním hořením směsi). Pokud je naším primárním cílem snížení spotřeby je nutné nezapomínat na komplexnost této problematiky a také na fakt, že na spotřebu mají vliv i další celky či komponenty (hmotnost automobilu, převodovka, pneumatiky apod.). [26, 32]

## 1.6 BMW Group

BMW, MINI a Rolls-Royce Motor Cars. Právě tyto tři značky tvoří světový koncern BMW Group, který se zaměřuje na sektor prémiových vozů mezinárodního automobilového trhu. Svých úspěchů dosahuje společnost rozdělením své síly s účinností, která nemá v automobilovém průmyslu obdoby. Od výzkumu přes vývoj až po prodej a marketing je BMW Group spojována s vysokou kvalitou svých produktů a poskytovaných služeb a právě její velký úspěch tkví ve správnosti této strategie. [33]

### 1.6.1 BMW

BMW je zkratkou pro Bayerische Motoren Werke AG, firmu která byla založena roku 1916 v Bavorském Mnichově a zprvu se zabývala výrobou leteckých motorů a teprve později se přes různé další produkty v roce 1923 dostala k výrobě motorek a nakonec v roce 1928 vyjel z továrny v Mnichově první automobil. Dnes jsou Bavorské motorové závody (Bayerische Motoren Werke - BMW) synonymem pro výrobu kvalitních luxusních vozů, které u řidičů vyvolávají opravdové potěšení ze samotné jízdy. [34, 35, 36]

V dnešní době jsou nejznámějšími automobily od BMW vozy řady 3 a 5. Tzv. pětková série vznikla roku 1972 a stala se symbolem pro luxusní vůz vyšší třídy. BMW řady 3 pak bylo určeno pro „mladší“ ročníky. Obě řady si ihned našly své příznivce a staly se vlajkovými loděmi bavorské automobilky. Skutečného luxusu se však v BMW dopustili až s příchodem sedmičky, která právem nese označení nejprestižnější řady elegantních limuzín BMW, vypuštěné v roce 1977. [33, 34, 35, 36]

Počátkem 90. let BMW vyrobili svůj první dvanáctiválcový motor, který se zároveň stal prvním takovým motorem v Německu. Pod kapotu ho dostaly legendární BMW 750i a BMW 750iL. Tou dobou se již BMW stalo nejprodávanější značkou luxusních vozů na světě. V současnosti se BMW snaží jít ruku v ruce s požadavky trhu a je možné tak v jeho nabídce najít i skutečně „malé“ vozy řady 1 (samozřejmě v luxurním provedení), nebo také vyložené „terénní“ vozy řady X3, X5 a nově i X6 a X7. Motory BMW však neustále platí za naprostou technologickou špičku a těžko hledají rovnocennou konkurenci. [33, 34, 35, 36]

### 1.6.2 BMW M divize

BMW M divize známá také jako M-Technik nebo jen "M" (pro Motorsport) byla původně vytvořena pro podporu závodního programu BMW, který byl velmi úspěšný v letech 1960 až 1970. Jak čas ubíhal, začala BMW M doplňovat široké portfolio BMW o speciálně upravená vozidla s vyšší výbavou jednotlivých modelů, které jsou dnes nejvíce známé široké veřejnosti. Tyto eMkově vybavená auta tradičně obsahují upravené motory, převodovky, zavěšení kol, obložení interiéru, aerodynamické vlastnosti a venkovní úpravy, které je odlišují od jejich protějšků. Všechny modely M jsou testovány a laděny v soukromém zařízení BMW na závodním okruhu Nürburgring v Německu. [33, 37]

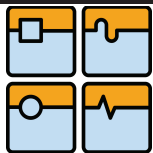
### 1.6.3 Používané technologie BMW

#### ▪ TwinPower Turbo

Pod označením TwinPower Turbo (**Obr. 1- 17**) se v technické praxi rozumí taková technologie přeplňování zážehových i vznětových motorů BMW, která se vyznačuje skutečností, že některá z částí systému přeplňování je zdvojená. Přínosem tohoto řešení je zejména rychlost reakcí přeplňovaných jednotek, jež se blíží standardním atmosférickým motorům. Motory disponující technologiemi TwinPower Turbo dosahují mnohem vyšších výkonů při nízké spotřebě a to na úrovni dané koncepce motoru. Nutno připomenout i výrazně menší hmotnost ve srovnání s podobně výkonnými atmosférickými motory. [26, 32, 38]

Pod označením BMW TwinPower Turbo se ukrývají následující technická řešení:

- motory přeplňované dvojicí stejně velkých turbodmychadel (například osmiválec modelu BMW 750i nebo BMW X6 xDrive50i či dvanáctiválec BMW 760i),
- jednotky přeplňované dvoukomorovým turbodmychadlem twin-scroll (například řadový zážehový šestiválec typů BMW 135i Coupé, BMW 335i, BMW X6 xDrive35i a další),



Obr. 1- 17 M TwinPower Turbo for BMW X5 M and BMW X6 M

- turbodiesely vybavené stupňovitým přeplňováním Variable Twin Turbo (například čtyřválec typu BMW 123d nebo šestiválcové modely BMW 335d, BMW 740d, BMW X5 xDrive40d a další),
- specialitou je motor používaný v modelech BMW X5 M a BMW X6 M, jejichž osmiválec přeplňovaný technologií BMW M TwinPower Turbo používá dvojici dvoukomorových turbodmychadel twin-scroll. [38]



Obr. 1- 18 Detail motoru s turbodmychadlem Twin scroll



#### ▪ Twin scroll

Twin scroll je označení dvoukomorového turbodmychadla (**Obr. 1- 18**) vyznačujícího se dvojicí samostatných kanálů na turbínové straně (každý pro dvojici válců), které se spojují až těsně před samotnou turbínou. Tímto technickým opatřením se eliminují nežádoucí jevy pulzací výfukových plynů ve výfukovém potrubí při výměně náplně válce. Velkým přínosem turbodmychadla twin scroll je především vyšší účinnost v nízkých otáčkách a rychlejší reakce motoru v důsledku lepšího vyplachování válce spalovacího motoru. Dvoukomorová turbodmychadla jsou použita například u zážehových šestiválců modelů BMW 135i Coupé, BMW 335i, BMW 535i nebo BMW X6 M. [38]


#### ▪ High Precision Injection (HPI)

„High Precision Injection dostane z každé kapičky benzínu naprosté maximum“, takhle prezentuje technologii vysokotlakého přímého vstřikování neboli High Precision Injection (HPI) automobilka BMW. HPI (**Obr. 1- 19**) se používá u všech zážehových motorů BMW. Prostřednictvím piezoelektrických vstřikovačů umístěných ve středu spalovacího prostoru a v těsné blízkosti zapalovací svíčky dochází ke vstřiku paliva přímo do spalovacího prostoru pod tlakem 20 MPa. Při každém vstřiku paliva tak vzniká kolem zapalovací svíčky oblak ideální směsi benzínu a vzduchu, jejíž poměr klesá s rostoucí vzdáleností od svíčky ve prospěch benzínu (po vrstvách) tzv. chudá vrstvená směs. K zážehu proto dochází nejdříve u samotné zapalovací svíčky a směs s menším obsahem paliva se zapálí postupně od již zažehnutého paliva. Mimořádná úspornost motorů BMW vybavených přímým vstřikováním HPI je zaručena faktem, že tyto motory jsou schopné pracovat s tzv. chudou vrstvenou směsí v mnohem širším spektru otáček a zatížení, než je obvyklé. To je způsobeno nejen vysokým pracovním tlakem, ale také velmi přesným dávkováním. [38]

Vysokotlaké přímé vstřikování HPI přináší úsporu paliva v závislosti na způsobu provozu až ve výši 20 procent, takže se významnou měrou podílí na přínosu strategie BMW Efficient Dynamics, která si klade za cíl neustále zvyšovat účinnost automobilu jako celku. Motory se vstřikováním HPI jsou kromě katalyzátoru vybavené také zádržným katalyzátorem oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). [38]



Obr. 1- 19 High Precision Injection (HPI)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 42
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ▪ VALVETRONIC

VALVETRONIC neboli plně variabilní časování zážehových motorů spojuje proměnné časování sacích i výfukových ventilů (double-VANOS) s možností plynulé změny zdvihu sacích ventilů. Je to právě zdvih sacích ventilů, jenž umožňuje regulovat chod motoru stejně jako škrticí klapka, jejímž nahrazením dochází k významné redukci čerpacích ztrát v sacím traktu vznikajících kolem částečně otevřené klapky konvenčního motoru. Použitím systému VALVETRONIC se podařilo snížit podtlak v sacím traktu (50 vs. 800 milibarů konvenčního motoru). Regulace motoru prostřednictvím změny zdvihu sacích ventilů má přínos nejen v menších ztrátách, ale také v rychlejších reakcích na pohyby plynového pedálu. [26, 32, 38]

Vzájemnou kombinací technologií přímého vstřikování HPI se systémem VALVETRONIC tak nové zážehové motory vyžadují po technické stránce nově řešený mechanismus měnící zdvih ventilů. Celý systém se tak stává více kompaktnější a vyznačuje se také rychlejší činností a menšími mechanickými odpory. [38]

Systémem VALVETRONIC rozhodně výčet technologií používaných firmou BMW nekončí. Jen pro rozšíření je možné zmínit např. koncept přímého vstřikování **common rail** používaný jak u vznětových, tak i zážehových motorů BMW, **turbodmychadlo s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek (VNT)** zajišťující rychlé reakce v nízkých otáčkách a současně velký plnicí tlak ve vysokých otáčkách, **celohliníkové konstrukce** motorů, čímž jsou motory lehčí, což má přímý vliv na rozložení hmotnosti a jízdní dynamiku a mnoho dalších. [38]

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

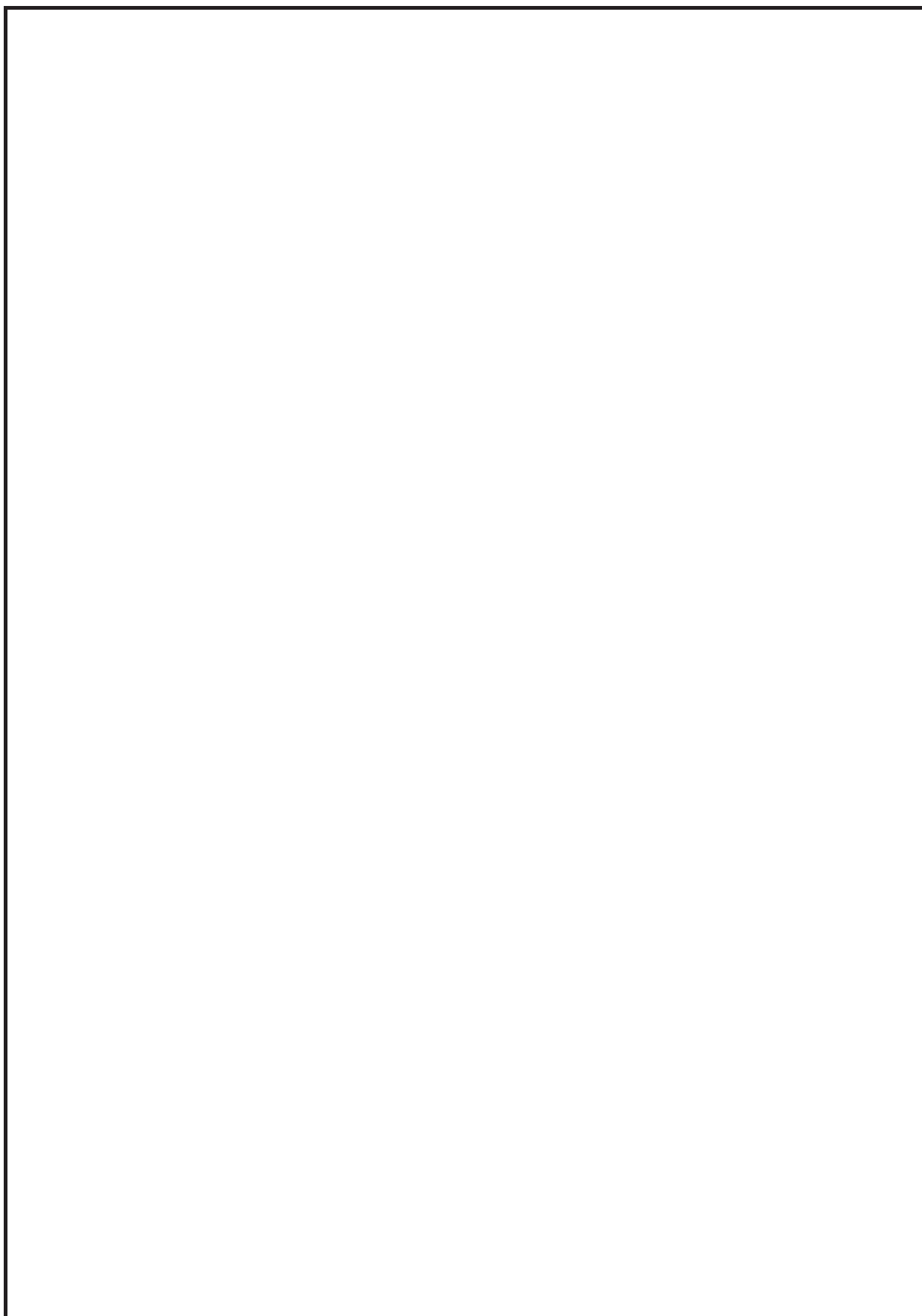
Tzv. přeplňování motorů v dnešním motoristickém světě není žádnou novinkou a sahá až do počátků 20. století, kdy mělo hlavní uplatnění v leteckých motorech. Charakteristickým znakem současných přeplňovaných motorů je jejich elektronická regulace, jejíž prudký rozvoj podstatně rozšiřuje užité vlastnosti motoru. To se promítá i do techniky přeplňování, která se stává jednou z hlavních inovačních metod této oblasti. [39, 40]

Přeplňované motory nejsou ekvivalentem pouze závodních nebo vysoce výkonných sportovních vozů, ale můžeme je najít i u malých automobilů, kde by klasický atmosférický motor neumožňoval takový přínos jako motor přeplňovaný. Základní myšlenkou přeplňování je turbodmychadlo a jeho možnost výrazně zvýšit výkon motoru, aniž by významně vzrostla jeho hmotnost. Nejenom nižší váha, ale také regulace plicích agregátů nejen ke zvýšení efektivního výkonu, točivého momentu a snížení spotřeby paliva, ale především k získání maximální pružnosti a tím i akcelerační schopnosti přeplňovaných motorů, činí turbo tak populární. [39, 40, 41]

S příchodem vozů X5 M a X6 M se postupně do slovníku značky BMW dostalo označení TwinPower Turbo, které představuje přeplňované motory, v nichž je alespoň nějaká část systému přeplňování dvojí. Toto označení může znamenat buď systém stupňovitěho přeplňování vznětových motorů pomocí dvojice stejně velkých turbodmychadel (tzv. bi-turbo) nebo (jak je tomu v případě BMW X6 M) použití TwinScroll turbodmychadla s dvojicí oddělených výfukových kanálů. [39]

Standardní provedení obtokového ventilu turbodmychadla (rameno a klapka zvlášť) se používá u všech benzínových aplikací. Řešení pomocí monobloku bylo navrženo speciálně pro aplikaci BMW X6 M za účelem vyřešení problémů WG při zátěžových testech. Dostatečný výkon a vynikající účinnost byly hlavními parametry, na jejichž základě bylo provedení pomocí monobloku shledáno dostatečným pro BMW X6 M.

V současné době podléhá toto řešení bližšímu zkoumání, zda existuje možnost jeho použití i pro jiné aplikace. Pokud toto řešení bude ohodnoceno jako úspěšné, poskytne tak firmě Honeywell lepší celkovou účinnost, menší opotřebení jednotlivých částí WG, nižší hlučnost a cenu ve srovnání s konkurencí. Je však nutné zohlednit i případnou možnost poklesu výkonu motoru vlivem netěsnosti obtokového ventilu při nízkých otáčkách a ulpívání klapky na dosedací ploše obtokového ventilu.



### 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem diplomové práce je analýza mezi praktického uplatnění obtokového ventilu TwinScroll turbodmychadla automobilu BMW X6 M užitím nástrojů DFSS (Design For Six Sigma).

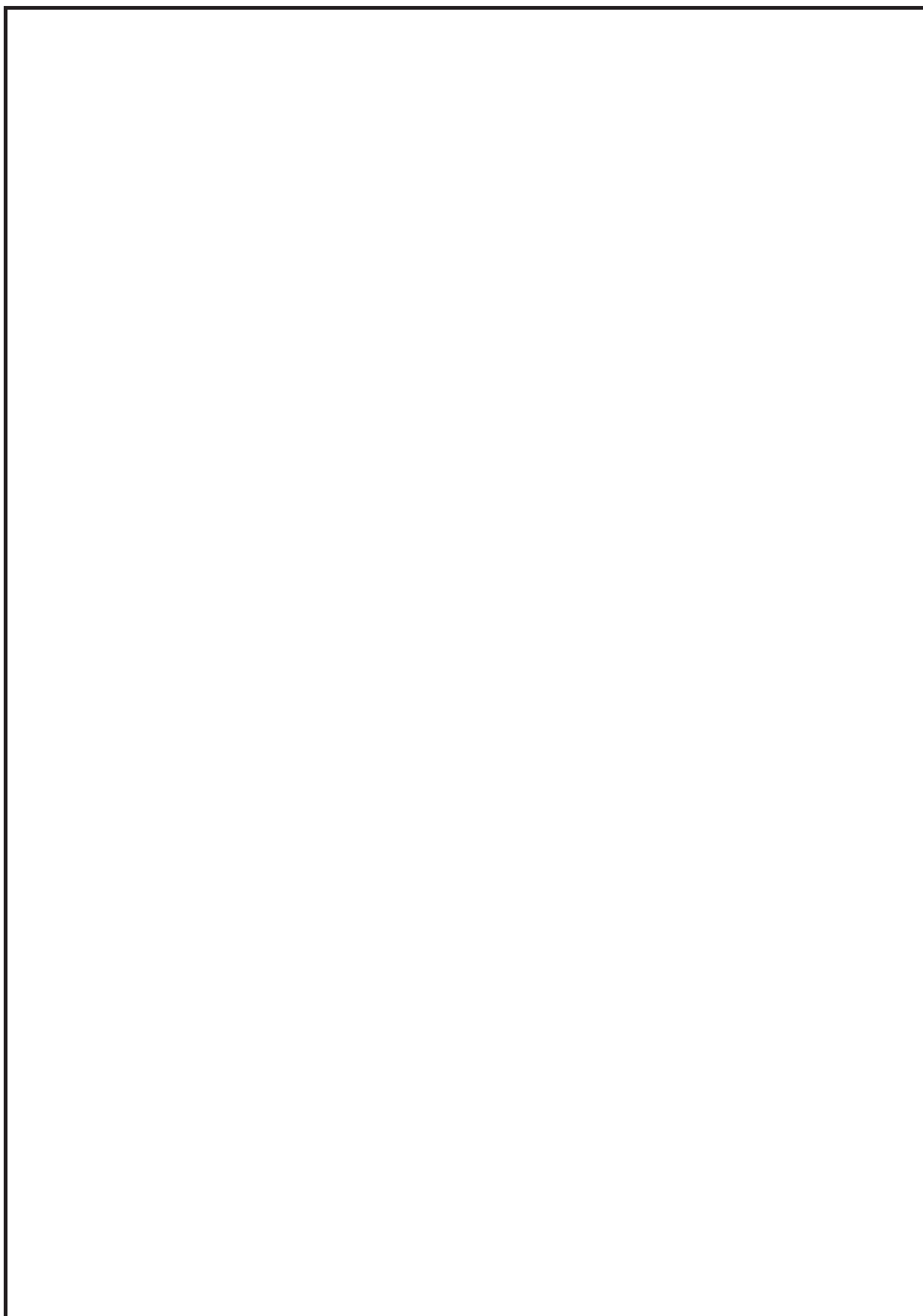
Cílem je tedy vytvoření speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu s možností otestování nejruznějších charakteristik majících vliv na klíčové parametry turbodmychadla.

Dílčí cíle diplomové práce:

- návrh a tvorba speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu turbodmychadla,
- vytvoření jednotlivých analýz pro ověření kritických vlivů a jejich možných následků:
  - hlas zákazníka (Voice of Customer),
  - kritické požadavky jakosti (Critical to Quality),
  - analýza požadavků zákazníka (Quality Function Deployment),
  - externí funkční analýza (Generic External Function Analysis),
  - předběžné hodnocení rizik (Preliminary Risk Assessment),
  - diagram příčin a následků (Ishikawův diagram),
  - FMEA (Failure Mode and Effects Analysis),
- měření a sběr dat pro vznik analýzy DOE (Design of Experiments),
  - graf hlavních účinků faktorů (Main Effects Plot),
  - graf vzájemných interakcí (Interaction Plot),
  - graf normální pravděpodobnosti reziduální chyby (Normal Probability Plot).
- zhodnocení získaných údajů.

Twin Scroll turbodmychadlo vozu BMW X6 M disponuje obtokovým ventilem jiného konstrukčního provedení než je tomu u standardních benzínových aplikací. Z tohoto důvodu se firma Honeywell Turbo Technology Brno rozhodla provést zhodnocení technických specifikací a možnosti použít systém monoblokového obtokového ventilu i u turbodmychadel pro menší objemy motoru.

Významný segmentem této práce je návrh speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu, jehož realizace je nutnou podmínkou k získání výstupů z měření nezbytných při tvorbě analýzy DOE.



## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Pro vytváření a zlepšování podnikových procesů využívá strategie Six Sigma celou řadu pomůcek a nástrojů z oblasti statistické analýzy, zajišťování obecné kvality procesů i řízení systémů jakosti dle normy ISO. Pro zlepšování výkonnosti procesů a udržení jejich kvality používá model DMAIC a jeho modifikace. S postupem času byly ve výrobních podnicích postupem DMAIC stále častěji řešeny otázky logistické povahy nebo otázky plánování a řízení výroby. Proto byl soubor nástrojů Six Sigma obohacen i o nástroje průmyslového inženýrství a vzniká Lean Six Sigma. [42, 43]

V následující kapitole je uveden výčet konkrétních nástrojů Six Sigma použitých při zpracování projektu, který je předmětem této diplomové práce. Jsou zde uvedeny jejich definice a principy a jsou uvedeny v časovém sledu tak, jak byly postupně na projekt implementovány.

### 4.1 Hlas zákazníka (Voice of Customer)

Kvalita může být definována jako plnění potřeb zákazníků a je jedním z rozhodujících faktorů, kterým se jednotlivé instituce navzájem odlišují. Vyjít vstříc potřebám zákazníků však vyžaduje tyto potřeby plně chápat. Hlas zákazníka (dále jen VOC) je termín sloužící k uvedení a popsání nevyjádřených potřeb a požadavků zákazníka. [44, 45]

VOC je možné zachytit mnoha způsoby:

- prostřednictvím přímých jednání či rozhovorů,
- průzkumy, pozorováním,
- zkušenostmi, specifikacemi zákazníka atd. [44, 45]

VOC nabízí zcela nové možnosti pro uvádění výrobků a služeb na trh, protože jen VOC může určit, co je skutečně důležité pro zákazníky. VOC do jisté míry představuje průzkum spokojenosti zákazníka, avšak jde více do hloubky a je zaměřen jak na ukazatele spokojenosti, tak na ukazatele nespokojenosti zákazníka. VOC následně umožňuje odvětví marketingu design a re-design výrobků, služeb, programů a postupů, které budou skutečně přispívat ke zlepšení spokojenosti a loajality zákazníků. [46, 47, 48]

Potřeby zákazníka je třeba dále promítnout do předběžných měřitelných hodnot charakteristik jakosti, které budou následně představovat předběžné cíle návrhu. Dalším krokem je tedy stanovení tzv. kritických požadavků (CTQ), které představují překlad požadavků zákazníka do podnikové terminologie. Proto je velmi nezbytné věnovat patřičnou pozornost VOC. [44, 47]

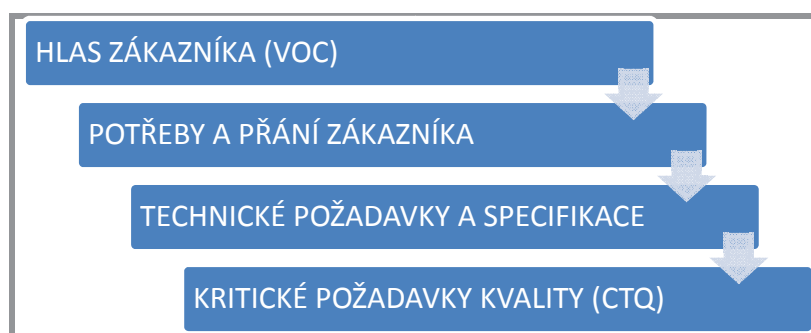
## 4.2 Kritické požadavky jakosti (Critical to Quality)

Jakmile byly jednou zachyceny požadavky zákazníka (zjištěné právě pomocí VOC), dalším krokem je převést je na tzv. měřitelné cíle neboli kritické parametry kvality (dále jen CTQ), které představují pro podnik faktory úspěšnosti na trhu. To je velice důležitý krok, protože pokud nebudeme schopni měřit, jak dobře pracujeme, nebudeme moci zaručit spokojenost cílových zákazníků s naším výsledným produktem nebo službou. [44, 49, 50]

Postupuje-li se touto metodou systematicky, je reálně vysoká pravděpodobnost respektování všech znaků, které vedou k uspokojení požadavků zákazníka. Tímto nástrojem lze získat poměrně podrobnou představu o tom, co má být procesem vytvářeno a jakým způsobem toho má být dosahováno. [46, 50]

Následující obrázek (**Obr. 4- 1**) zachycuje převod hlasu zákazníka na kritické znaky jakosti sloužící jako specifické limity pro hodnocení kvality procesu. [50]

Prostřednictvím tohoto postupu lze získat poměrně přesnou představu o tom, co má být procesem vytvářeno. Výsledkem je co nejúplnější popis vlastností produktu z hlediska zákazníka. Postupným převáděním funkčních vlastností na vlastnosti fyzikální, chemické, ekonomické atd. se dá v konečném počtu kroků dospět k seznamu jednoduchých, jednoznačně definovaných znaků, jejich cílovým hodnotám a přípustným tolerancím. Takto vytvořený seznam je vstupem pro vytvoření a seřízení procesu i jeho následného řízení. [46, 49]



Obr. 4- 1 VOC->CTQ

## 4.3 Analýza požadavků zákazníka (Quality Function Deployment)

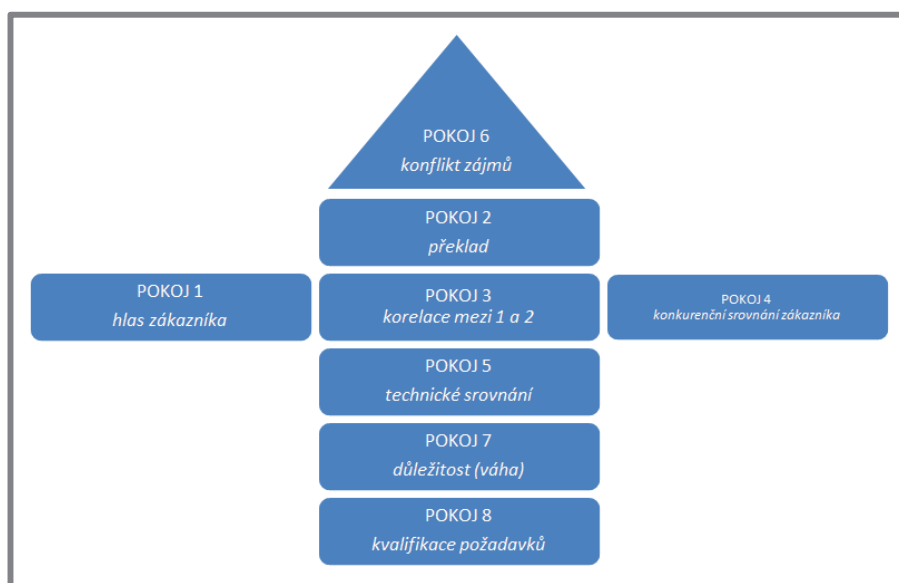
Analýza požadavků zákazníka (QFD) představuje systematickou a osvědčenou metodu pro převod požadavků zákazníka do měřitelných specifikací produktu. QFD se sestává z jednotlivých metod:

- plánování kvality produktů,
- plánování kvality komponentů,
- plánování kvality procesů,
- plánování kvality produkce. [51]



Hlavní podmínkou QFD je důsledné dodržování hlasu zákazníka (VOC) s cílem předstihnout konkurenci. [51]

Styčným bodem QFD je tzv. dům kvality (HOQ - House of Quality; **Obr. 4- 2**), založený na principu maticového diagramu. HOQ slouží ke stanovení a pochopení potřeb a požadavků zákazníka a jejich transformaci do dalších stádií plánování jakosti a vývoje produktu a procesů jeho realizace. Během QFD procesu vývojový tým složený z pracovníků ze všech odborných útvarů zapojených do vývoje a výroby produktu prostřednictvím domu kvality nejprve identifikuje požadavky a představy zákazníků do konkrétní podoby znaků jakosti produktu, přes znaky jakosti dílů, parametrů procesu až do výrobních instrukcí popř. dalších fází návrhu a vývoje produktu. [51, 52, 53]

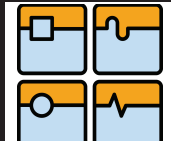


**Obr. 4- 2** Analýza požadavků zákazníka QFD

Dům kvality je první maticí, kterou vývojový tým používá k zahájení procesu QFD. Je velice silným nástrojem a to z důvodu značného množství informací, které mohou být zdokumentovány a analyzovány. Metoda QFD vyžaduje, aby si tým kladl konkrétní otázky týkající se potřeby zákazníků, konkurence a v neposlední řadě také otázky jak organizace bude reagovat na výzvy při poskytování produktů, které v konečném důsledku povedou k uspokojování přání a potřeb zákazníků. [52, 53, 54]

Stejně jako u všech ostatních matic představují řádky vstupy a sloupce požadované výstupy. Vstupy jsou hlas zákazníka (VOC). Celý diagram disponuje osmi poli (pokoji) a každé z nich reprezentuje rozdílné hledisko plánovaného výrobku. Dům jakosti je „postaven“, jakmile jsou vyplněny všechny pokoje nezbytnými vstupy a výstupy. [55]

*Pokoj 1* představuje hlas zákazníka (VOC), který je však velmi subjektivní, kvalitativní a netechnický a při vývoji nového výrobku je důležité, aby byl transformován do jazyka podnikového a to jazyka kvantitativního a technického. Prakticky se jedná o značné

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 50
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

množství požadavků zákazníka, které jsou redukovány na dvacet až třicet nejdůležitějších potřeb. [55, 56]

*Pokoj 2* je dalším krokem při tvorbě domu kvality (HOQ). Zde se od celého týmu žádá, aby pro každé „co?“ (požadavky zákazníka) našel odpověď „jak?“ (technická opatření). Tým tedy musí přijít alespoň s jedním opatřením, které je možné měřit a tím adekvátně charakterizovat chování produktu. [55, 56]

*Pokoj 3* vymezuje vzájemnou korelaci mezi pokoji 1 a 2. Na základě rozhodnutí skupiny, tým přiřadí váhové koeficienty (silná, střední, slabá nebo žádná korelace) k jednotlivým požadavkům zákazníka a technickým opatřením. Tým zde verifikuje a zlepšuje přesnost navržených technických opatření. [55, 56]

*Pokoj 4* předpokládá konkurenční srovnání z pohledu zákazníka. Cílem je zjistit, jak zákazník vnímá konkurenci a její schopnost plnit každý z jeho požadavků. Každý „soutěžní“ výrobek musí být porovnán s požadavky zákazníka [55, 56]

*Pokoj 5* reprezentuje technické srovnání jednotlivých výrobků za použití standardních testů. Analýza konkurenčního srovnání zákazníka a technického srovnání může pomoci odhalit problémy ve vnímání. Technické srovnání totiž paradoxně nemusí odpovídat srovnávání prostřednictvím koncového zákazníka, ačkoliv technické parametry hovoří jinak. V případě, že srovnání není dostupné, ohodnotí se existující plnění potřeb zákazníka. [55, 56]

*Pokoj 6* neboli konflikt zájmů. Jsou chvíle, kdy se u mnoha produktů požadavky zákazníka převádí do fyzických vlastností prvků, které jsou ve vzájemném konfliktu. Tyto konflikty se obvykle zrcadlí v technických opatřeních. Tato korelační matice se používá k řešení těchto konfliktů tím, že zdůrazňuje, která technická opatření mají největší podíl na příslušném konfliktu. [55, 56]

*Pokoj 7* je prostor pro vyjádření tzv. váhových koeficientů každého požadavku. Nastane-li situace, že dva požadavky jsou důležité a složité a dojde k vzájemné iteraci v konfliktu zájmů, pak je těmto požadavkům věnována největší pozornost. [55, 56]

*Pokoj 8* je posledním objektem celého domu jakosti. Je charakteristický kvantifikací požadavků na nový produkt. Na základě technického srovnání zde vývojový tým odvozuje hodnoty požadavků na nový (lepší) produkt. [55, 56]

Dům kvality je často označován první fází matice. V procesu QFD existuje také druhá fáze matice, která převádí technické údaje již hotového výrobku do vlastností designu (geometrie, funkce, materiály atd.) a jejich příslušných specifikací. Někdy se používá i třetí fáze matice a to pro přisouzení vlastností konstrukčních specifikací do specifikací výrobního procesu (teplota, tlak, viskozita apod.). [55, 56]

Proces QFD využívá řadu matic, které jsou vzájemně propojeny v průběhu procesu vývoje produktu nebo služby. Toto kaskádové seřazení přání a potřeb zákazníka se vyhodnocuje prováděním vyhodnocení každé úrovně a to procházením jednotlivých místností, které mají své specifické funkce. [51, 52, 53]

Dům jakosti je “postaven”, když jsou vyplněny všechny nezbytné vstupy a výstupy. Po jeho dokončení používá meziútvarový tým QFD pro další překlad požadavků do návrhu výrobku, procesu, atd. Výstup každé matice je vstupem pro další matici. [57, 58]

#### 4.4 Externí funkční analýza (Generic External Function Analysis)

Externí funkční analýza (dále jen ExtFA) je metoda sběru a shromažďování požadavků a specifikací zákazníka. Vyžaduje pochopení požadované funkce výrobku, ale ne nutně současného designu produktu. Pokud konečný produkt (konstrukce) splňuje původní požadavky zákazníka, shromažďuje analýza kritéria pro měření. Dále může být použita k potvrzení stanoviska v případě, pokud se na nové požadavky zákazníka vztahují stávající kvalifikované návrhy. Externí funkční analýza (ExtFA) je úzce spojena i s jinými nástroji jakosti, jako je např. hlas zákazníka (VOC), analýza požadavků zákazníka (QFD), průzkum mezi zákazníky aj., ale jejím hlavním úkolem je zachytit technické požadavky a informace o výrobku. [59]

Do tvorby a schvalování ExtFA by měli být zapojeni: produktový inženýr, APQP inženýr, platformový inženýr, celý aplikační tým a programový manažer. ExtFA začíná ve fázi procesu vývoje produktu (PEP fáze) a je používána ve všech následujících PEP fázích k zajištění shody výrobku s původními požadavky zákazníka. Analýza by měla být použita pro stanovení funkčnosti a kritérií, které musí daný výrobek splňovat, aby uspokojil požadavky zákazníka. [59]

#### 4.5 Předběžné hodnocení rizik (Preliminary Risk Assessment)

Předběžné hodnocení rizik (dále jen PRA) je metoda určená k pochopení vlivu funkčních vymezení stanovených externí funkční analýzou (ExtFA) a jejich hlavních nežádoucích událostí, které v jejich důsledku nastávají. Metoda hodnocení rizik (PRA) kvantifikuje tyto nežádoucí události. Jelikož nemusí být nutně spojena s designem produktu, dívá se na problematiku komplexně, a to z pohledu koncového zákazníka a interní problematiky firmy, a ne do hloubky, aby odhalila skutečné kořenové příčiny neúspěchu. [60]

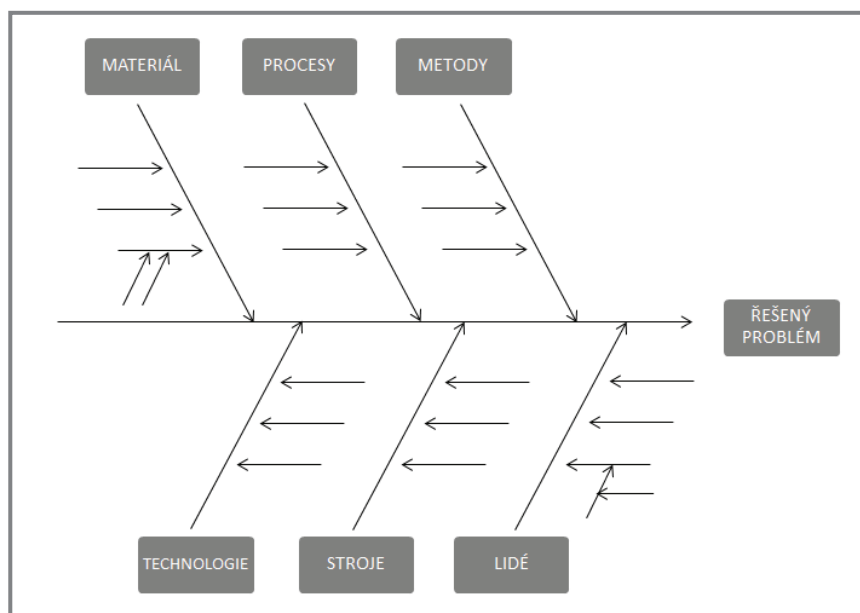
Pomocí hodnocení závažnosti, může být PRA použita pro stanovení priorit při plánování projektů. Stejně jako ExtFA se PRA spouští ve fázi procesu vývoje produktu (PEP fáze) a je používána i ve všech ostatních PEP fázích. [60]

PRA využívá všech funkcí stanovených během ExtFA k odhalení a porozumění toho, co by se stalo, kdyby této funkce nebylo dosaženo. V případě, že této funkci není dosaženo, výsledkem je tzv. nežádoucí událost a to jak z pohledu firmy, tak z pohledu koncového zákazníka. Hlavní nežádoucí události mohou být dále použity jako přímý vstup pro analýzu stromu poruch (FTA - Fault Tree Analysis). [60]

#### 4.6 Diagram příčin a následků (Ishikawův diagram)

Diagram příčin a následků (Ishikawův diagram) je také znám jako diagram „rybí kostry“. Jedná se o nástroj používaný k systematické identifikaci a prezentaci všech možných příčin a následků (jednotlivé vstupy) pomocí grafického formátu a měl by být prvním krokem k řešení všech problémů, jež mohou být způsobeny více příčinami. Většinou se jedná o vstupy z brainstormingu projektového týmu, který se prostřednictvím Ishikawova diagramu může soustředit na důvod, proč se daný problém vyskytuje a ne na jeho historii nebo příznaky, které by tak mohly uškodit původnímu záměru zasedání projektového týmu.[61, 62]

Možné příčiny jsou prezentovány na různých úrovních jednotlivých větví připojených k hlavní vodorovné linii. Jádrem diagramu je přesně vymezený problém zaznamenaný v rámečku na pravé straně (**Obr. 4- 3**), z něhož vychází ústřední přímka, ke které směřují



Obr. 4- 3 Ishikawův diagram

hlavní větve reprezentující základní příčiny, které jsou pak dále rozkládány na příčiny dílčí na postupně rostoucí úrovni podrobnosti. Přehledné soustředění všech příčin pak umožní celý problém rozebrat a následně nalézt přípustné řešení. [61, 62, 63]

Správně vytvořený Ishikawův diagram lze použít k efektivnímu řešení organizačním problémů společnosti. Neexistují totiž žádná omezení při aplikaci schémat na různé problémy nebo oblasti řešení. Úroveň a intenzita brainstormingu určují úspěšnost diagramu příčin a následků a proto by měly být přítomny všechny příslušné strany projektového týmu s cílem identifikovat všechny možné příčiny. Jakmile je identifikována nejpravděpodobnější příčina, jsou nutná další šetření za účelem stanovení dalších podrobností. [64]

#### 4.7 FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

Zvýšené nároky společnosti na vysoce kvalitní a spolehlivé výrobky nutí výrobce udržet kvalitu a spolehlivost svých produktů na co nejvyšší možné úrovni. Běžně bývalo spolehlivosti dosahováno prostřednictvím rozsáhlého testování a používání technik, jako je spolehlivost pravděpodobnostních modelů. Tyto techniky se však používají v pozdních fázích vývoje. Úkolem tak bylo navrhnout nástroj pro ranou fázi vývojového cyklu, který by pomohl odhalit možné vady a jejich důsledky. [65, 66]

Analýza možných vad a jejich důsledků (FMEA) je strukturovaná metoda, která umožňuje odhalovat a priorizovat možné problémy a jejich následky a následně pak vyhodnocovat vhodnost opatření, které slouží k eliminaci těchto problémů. Jedná se o metodiku probíhající v rané fázi vývojového cyklu, kde je snadnější přijmout opatření k překonání těchto problémů a zvýšit tak spolehlivost prostřednictvím konstrukčních nebo procesních návrhů. FMEA pomáhá identifikovat možné způsoby selhání, určit jejich vliv na provoz výrobku nebo procesu a stanovit opatření ke zmírnění poruch. Klíčovým krokem je předvídat, jak by mohl výsledný produkt/proces selhat. Ačkoli není možné předvídat veškeré možné režimy selhání, měl by se vývojový tým pokusit formulovat rozsáhlý seznam možných způsobů selhání do takové míry, jak je to jen možné. [65, 66, 67]

Včasné a důsledné používání FMEA v procesu návrhu umožňuje vyvarovat se možným chybám a produkovat spolehlivé, bezpečné a zákazníkům atraktivní výrobky. FMEA je schopná také zachytit informace, které mohou být v budoucnu použity ke zlepšení stávajících produktů. [65, 66, 67]

Existuje několik typů FMEA s tím, že některé se používají mnohem častěji než ostatní. FMEA by měla být provedena vždy, když by selhání znamenalo škody, zranění nebo újmu pro koncového uživatele. [66, 67]

Druhy FMEA:

- systémová
  - zaměřuje se na globální funkce systému,
- konstrukční
  - zaměřuje se na druhy vad způsobené nedostatky konstrukce,

- procesní
  - zaměřuje se na výrobní a montážní procesy, nedostatky procesu, výroby nebo montáže,
- servisní
  - zaměřuje se na procesy v sektoru služeb,
- softwarová
  - zaměřuje se na softwarové funkce. [67, 68]

#### 4. 8 DOE (Design of Experiments)

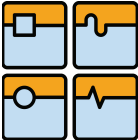
Statisticky navržený experiment (DOE) je v dnešní době bezesporu nejsilnějším nástrojem zlepšování procesů. Metody pro určování způsobu zvyšování produktivity a zlepšování kvality se neustále vyvíjejí a od nákladných a časově náročných pokusů a omylů se změnila na elegantní a cenově příznivé statistické metody jako je právě DOE. [68, 69]

DOE se dá popsat jako systematický přístup k vyšetřování systému nebo procesu. Série strukturovaných testů jsou navrženy tak, aby byly ovlivňující faktory systematicky studovány a tím tak dosaženy požadované či specifikované jakostní parametry nastavením těchto faktorů. Cílem je pak zkoumat dopady těchto změn na předem definované výstupy. [70, 71]

Dobře provedený experiment může poskytnout odpovědi na otázky jako:

- Jaké jsou klíčové faktory procesu?
- Při jakém nastavení by proces poskytl přijatelný výstup?
- Jaké jsou hlavní účinky procesu a případné interakce mezi jednotlivými hlavními účinky?
- Jaké nastavení by přineslo menší rozdíly ve výsledku? [71]

DOE se používá pro testování složitých úloh, u kterých je konečný výsledek dán kombinací mnoha faktorů. Za účelem minimalizace optimalizačních problémů je důležité udržet nízké náklady tím, že se provádí pouze několik pokusů. Statisticky navržený experiment je užitečný v tom, že vyžaduje jen malý počet vzorků podstatných z hlediska kvality, a tím výrazně přispívá ke snižování nákladů. [69, 71, 72]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 55
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

[STRANY 55-92 NEZVEŘEJNĚNY]





## 6 ZÁVĚR

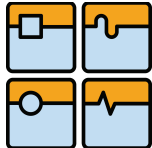
Tato diplomová práce měla poukázat na meze praktického uplatnění obtokového ventilu TwinScroll turbodmychadla automobilu BMW X6 M užitím nástrojů DFSS (Design For Six Sigma). Charakteristické provedení systému obtokového ventilu turbodmychadla TwinScroll bylo speciálně navrženo pro motor BMW X6 M za účelem vyřešení problémů s paralelním obtokovým ventilem výfukových plynů, který slouží k regulaci plnicího tlaku zejména ve vysokých otáčkách motoru, při zátěžových testech. V současné době podléhá toto řešení bližšímu zkoumání, zdali existuje možnost jeho použití i pro jiné aplikace.

Hlavním úkolem tedy bylo vytvoření speciálního přípravku pro měření těsnosti obtokového ventilu s možností otestování nejrůznějších charakteristik majících vliv na klíčové parametry turbodmychadla, jehož realizace byla nutnou podmínkou k získání výstupů z měření nezbytných při tvorbě analýzy DOE, která byla zpracována v závěru diplomové práce.

Z výsledků měření a jednotlivých testů uvedených v kapitole 5 je patrný významný vliv zkoumaných parametrů (tlak v systému, radiální vůle a zatížení klapky obtokového ventilu) na systém klapky a sedla obtokového ventilu turbodmychadla. Je však nutné si uvědomit, že testováno bylo pouze úzké spektrum možných faktorů a pro komplexnost celého problému je zapotřebí ověřit i účinky dalších parametrů. K tomuto účelu poslouží výstupy z předchozích studií a to zejména analýza požadavků zákazníka a FMEA. Právě tyto analýzy hovoří o účinku jak radiálních tak axiálních vůlí mezi klapkou a sedlem obtokového ventilu, zdůrazňují důležitost působení zatížení na rameno klapky ventilu reprezentující účinek pneumatického aktuátoru a definující velikost uzavírací síly ventilu v závislosti na velikosti klapky a sedla ventilu resp. uzpůsobení vzájemné dosedací plochy. Studiemi takto vyzdvižené charakteristiky je vhodné ověřit a posoudit z hlediska jejich statistické významnosti. Důležitým aspektem paralelního obtokového ventilu v provedení tzv. monoblocku je absence vůlí v uložení, kde rameno a klapka ventilu jsou vyrobeny z jednoho dílu. Naproti tomu u tzv. standardního provedení, kde rameno a klapka ventilu jsou zvlášť a navzájem spojené prostřednictvím nýtu se zaručenou vůlí umožňující pohyb, je zapotřebí si položit otázku: “Do jaké míry je existence vůle v uložení schopna minimalizovat účinky nevyhovujícího konstrukčního provedení klapky a sedla ventilu?”

Jak už bylo řečeno, tato práce se nezabývá zdaleka všemi vlivy, které je možné testovat v rámci zmíněné problematiky. Poznatky získané prostřednictvím této práce by měly posloužit k dalšímu prohloubení znalostí a případnému zpracování disertační nebo jiné diplomové práce nebo jako výchozí bod pro komplexní studii shrnující diagnostiku obtokového ventilu turbodmychadla v tomto oboru.


Je nutné podotknout, že výzkumná činnost v oblasti testování konstrukčního návrhu obtokového ventilu TwinScroll turbodmychadla automobilu BMW X6 M probíhala a probíhá

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 94
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

paralelně a nezávisle na této diplomové práci a v nadcházejícím období se předpokládá intenzivní výzkum pro odhalení možností použitelnosti vhodného konstrukčního uspořádání.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AUTO TUNING WALLPAPERS, *O Auto Tuning - TURBO a PŘEPLŇOVÁNÍ* [online]. c2011. [cit. 1.10.2011]. Dostupné z:< <http://www.autotuning.on-line-obchod.cz/tuning-turbo-preplnovani.html>>.
- [2] AUTO.CZ, *Přeplňování (1. díl): teorie+mechanické přeplňování* [online]. c2011. [cit. 1.10.2011]. Dostupné z:< <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani-16778>>.
- [3] BOOSTER ONLINE, *Turbocharging – Revolution Through Evolution* [online]. c2011. [cit. 1.10.2011]. Dostupné z:< <http://www.honeywellbooster.com/turbotalk/turbocharging-%E2%80%93-revolution-through-evolution/>>.
- [4] TRILOGIQ, *Filozofie štíhlé výroby* [online]. c2010. [cit. 23.10.2011]. Dostupné z:< <http://trilogiq.cz/filosofie-stihle-vyroby/>>.
- [5] DESIGNING KAIZEN, *What is Lean Manufacturing?* [online]. c2010. [cit. 23.10.2011]. Dostupné z:< <http://www.designingkaizen.com/what-is-lean-manufacturing.html>>.
- [6] PROCESS QUALITY ASSOCIATES INC., *Lean Manufacturing* [online]. c2009. [cit. 23.10.2011]. Dostupné z:< <http://www.pqa.net/ProdServices/leanmfg/lean.html>>.
- [7] NEUSTRO, *What is Lean Manufacturing?* [online]. c2008. [cit. 23.10.2011]. Dostupné z:<[http://www.neustro.com/lean\\_manufacturing.aspx](http://www.neustro.com/lean_manufacturing.aspx)>.
- [8] LEAN MANUFACTURING, *What is Lean Manufacturing?* [online]. c2009. [cit. 23.10.2011]. Dostupné z:< <http://whatisleanmanufacturing.com/>>.
- [9] DESIGN FOR SIX SIGMA, *Design For Six Sigma* [online]. c2011. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.designsixsigma.com/>>.
- [10] VELACTION, *Lean definition: DMAIC (lean six sigma problem solving)* [online]. c2008. [cit. 22.10.2011]. dostupné z:< <http://www.velaction.com/lean-dmaic-methodology-problem-solving/>>.
- [11] CREATIVE SAFE SUPPLY, *DMAIC* [online]. c2009. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.creativesafesupply.com/ProductInfo/DMAIC.html>>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 96
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

[12] EXECUTIVE DASHBOARD, *Six Sigma, DMAIC DMADV Methodology* [online]. c2009. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.executive-dashboard.org/six-sigma/dmaic-method.htm>>.

[13] BUZZLE.COM, *Six Sigma DMAIC Tools* [online]. c2009. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.buzzle.com/articles/six-sigma-dmaic-tools.html>>.

[14] MANAGEMENT STUDY GUIDE, *DMADV Methodology – Meaning and Rules For Implementing DMADV* [online]. c2010. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.managementstudyguide.com/dmadv-methodology.htm>>.

[15] HONEYWELL, *About Us* [online]. c2011. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://honeywell.com/About/Pages/our-company.aspx>>.

[16] HONEYWELL, *Technology and Research* [online]. c2011. [cit. 22.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.honeywell.com/sites/cz/en/Honeywell-Technology.htm>>.

[17] AUTOMOTIVE WORLD.COM, *The Future is Turbocharged!* [online]. c2010. [cit. 27.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.automotiveworld.com/news/suppliers/86446-the-future-is-turbocharged>>.

[18] TURBO TEC, *Turbodmychadla* [online]. c2011. [cit. 27.10.2011]. Dostupné z:<[http://www.turbo-tec.eu/cz/index.php?page=sub\\_turbochargers](http://www.turbo-tec.eu/cz/index.php?page=sub_turbochargers)>.

[19] OCTAVIA CLUB, *Turbodmychadlo* [online]. c2010. [cit. 27.10.2011]. Dostupné z:<<http://www.octaviacub.cz/clanky/turbodmychadlo-315.html>>.

[20] SKETA SHOP, *Turbodmychadla* [online]. c2008. [cit. 30.10.2011]. Dostupné z:<[www.sketa-shop.ic.cz/predmety/bspe/BSPE-Turbodmychadla.doc](http://www.sketa-shop.ic.cz/predmety/bspe/BSPE-Turbodmychadla.doc)>.

[21] HOLÍK, P. *Turbodmychadla spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

[22] AUTO.CZ, *Přepřínování (2. díl): turbodmychadla* [online]. c2011. [cit. 5.11.2011]. Dostupné z:<<http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmychadla-16765>>.

[23] SKETA SHOP, *Turbodmychadla* [online]. c2008. [cit. 30.10.2011]. Dostupné z:<[www.sketa-shop.ic.cz/predmety/bspe/BSPE-Turbodmychadla.doc](http://www.sketa-shop.ic.cz/predmety/bspe/BSPE-Turbodmychadla.doc)>.

[24] HOLÍK, P. *Turbodmychadla spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

[25] KADLEČEK, J. *Přepřínování spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.

[26] HONEYWELL TURBO TECHNOLOGIES, *How VNT Works?* [online]. c2011. [cit. 27.12.2011]. Dostupné z: <[http://www.honeywell.com/sites/ts/tt/turbofactsbenefits\\_VNTworks.htm](http://www.honeywell.com/sites/ts/tt/turbofactsbenefits_VNTworks.htm)>.

[27] HOFMANN, K. *Alternativní pohony*. Studijní opory dopravního a automobilního inženýrství. 73 s. [online]. c2009. [cit. 27.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.iae.fme.vutbr.cz/cs/studium/opory/alt.pohony.pdf>>.

[28] STANĚK, L. *Regulace turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vančura.

[29] VERTAL, Peter. Provoz a údržba vozidel s přepřínovanými motory turbodmychadly: diplomová práce. Brno, 2010. 65s. Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Aleš Vémola, PhD.

[30] EVO, *Přepřínovaná auta- budoucnost!* [online]. c2011. [cit. 27.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.i-evo.cz/clanky/preplnovana-auta-budoucnost>>.


[31] BUSINESS CAR, *Spalovací motor do penze jen tak nepůjde* [online]. c2011. [cit. 27.12.2011]. dostupné z: <<http://www.business-car.cz/clanek/spalovaci-motor-do-penze-jen-tak-nepujde>>.

[32] AUTO WEB, *BMW X5 M a BMW X6 M oficiálně!* [online]. c2011. [cit. 27.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.autoweb.cz/bmw-x5-m-a-bmw-x6-m-oficialne/>>.

[33] BMW, *Mezinárodní úspěch* [online]. c2011. [cit. 28.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.bmw.cz/cz/cs/insights/corporation/bmwgroup/content.html>>.

[34] TOČIVÝ MOMENT, *Automobilka BMW* [online]. c2011. [cit. 28.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.tocivymoment.cz/bmw/>>.

[35] E91, *BMW Moto* [online]. c2010. [cit. 28.12.2011]. Dostupné z: <<http://e91.cz/tag/bayerische-motoren-werke-ag>>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 98
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

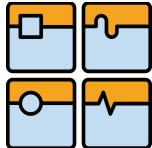
- [36] MÓDA TUNING TECHNIKA, *Motorky BMW* [online]. c2008. [cit. 28.12.2011]. Dostupné z:< <http://www.motobazar-brno.cz/motorky/?p=17>>.
- [37] BMW DRIVES, *BMW M history BMW* [online]. c2011. [cit. 28.12.2011]. Dostupné z:< <http://www.bmwdrives.com/bmw-m-history.php>>.
- [38] FAMOUS BMW, *Technologie motorů ve vozech BMW pro rok 2010* [online]. c2010. [cit. 27.12.2011]. Dostupné z:< <http://www.famousbmw.cz/technologie-motoru-ve-vozech-bmw-pro-rok-2010/>>.
- [39] BMW REVUE, *BMW TwinPower Turbo* [online]. c2011. [cit. 1.10.2009]. Dostupné z:< <http://bmwrevue.cz/clanek.php?id=218>>.
- [40] HOW STUFF WORKS???, *How Turbochargers Works?* [online]. c2010. [cit. 1.10.2011]. Dostupné z:<<http://auto.howstuffworks.com/turbo.htm>>.
- [41] ÚDT FSI VUT BRNO, *Regulované přepřehování vozidlových motorů* [online]. c2011. [cit. 1.10.2008]. Dostupné z:<[www.ksd.tul.cz/studenti/texty/Hofmann\\_Preplnovani.pdf](http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/Hofmann_Preplnovani.pdf)>.
- [42] 6σ, *Six Sigma* [online]. c2011. [cit. 25.3.2012]. Dostupné z:< <http://www.6s.cz/nastroje/>>.
- [43] INTER QUALITY, *Six Sigma v průmyslu* [online]. c2010. [cit. 25.3.2012]. Dostupné z:< <http://www.sixsigma-iq.cz/SIXSIGMAVPR%C5%AEMYSLU.aspx>>.
- [44] VOICE OF CUSTOMER, *Voice of the Customer: A Whole New World for the Marketing Professional* [online]. c2009. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.voiceofthecustomer.ca/>>.
- [45] VOICE OF CUSTOMER, *Capturing the voice of the customer* [online]. c2002. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.npd-solutions.com/voc.html>>.
- [46] FIALA A., *Monitorování a řízení procesů*. VUT v Brně Fakulta strojního inženýrství [online]. c2009. Dostupné z:<[http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Fiala\\_procesy.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Fiala_procesy.pdf)>.
- [47] PQM OSTRAVA, *Plánování kvality (APQP)* [online]. c2010. Dostupné z:<[http://www.pqm.cz/NVCSS/met\\_PDF/APQP\\_webcss.pdf](http://www.pqm.cz/NVCSS/met_PDF/APQP_webcss.pdf)>.
- [48] SYSTEM ON LINE, *Od akvizice k maximalizaci hodnoty vztahu - iii. díl* [online]. c2011. [cit. 1.10.2011]. dostupné z:< <http://www.systemonline.cz/clanky/od-akvizice-k-maximalizaci-hodnoty-vztahu-iii-dil.htm>>.



- [49] BORKOVÁ I., *Řízení a zlepšování výrobních procesů pomocí metodologie six sigma*. Brno: Masarykova universita v Brně, Ekonomicko-správní fakulta, 2009. 53s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radoslav ŠKAPA, Ph.D.
- [50] PROCESSMA, *Critical to quality* [online]. c2009. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<[http://www.processma.com/resource/critical\\_to\\_quality.htm](http://www.processma.com/resource/critical_to_quality.htm)>.
- [51] VŠB TECNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, *Využití metody QFD při optimalizaci návrhu svařovacího drátu*[online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. dostupné z:<<http://katedry.fmfi.vsb.cz/639/qmag/mj37-cz.htm>>.
- [52] CREATIVE INDUSTRIES RESEARCH INSTITUTE, *Quality Function Deployment* [online]. c2009. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.ciri.org.nz/downloads/Quality%20Function%20Deployment.pdf>>.
- [53] QI MACROS, *Quality Function Deployment House of Quality* [online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.qimacros.com/free-lean-six-sigma-tips/qfd-house-of-quality.html>>.
- [54] BECKER-ASSOCIATES, *The house of quality: matrix "I" in a QFd proces* [online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.becker-associates.com/thehouse.htm>>.
- [55] K3 - Konzultační středisko Třinec - VŠP,a.s. Ostrava, *Pokročilé nástroje jakosti* [online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.k3.silesnet.cz/Materialy/TQM/TQM5.pdf>>.
- [56] MASET, *Description of the QFD Process* [online]. c2011. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.masetllc.com/products/418.shtml>>.
- [57] PQM OSTRAVA, *QFD – Quality Function Deployment* [online]. c2010. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<[http://www.pqm.cz/NVCSS/met\\_PDF/qfd\\_webcss.pdf](http://www.pqm.cz/NVCSS/met_PDF/qfd_webcss.pdf)>.
- [58] CALIFORNIA STATE UNIVERSITY CHICO, *The house of quality* [online]. c2010. [cit. 3.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.csuchico.edu/~jtrailer/HOQ.pdf>>.
- [59] McARDLE Nathan, 24.2.2. *External Functional Analysis*, Torrance CA, USA; Honeywell. [cit. 3.9.2011].
- [60] CARMIER Eric, *Generic External Functional Analysis*, Torrance CA, USA; Honeywell. [cit. 3.9.2011].

- [61] SILICONFAREAST.COM, *Ishikawa Diagram* [online]. c2005. [cit. 17.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.siliconfareast.com/ishikawa.htm>>.
- [62] PODPŮRNÉ STRÁNKY PAVLA STRÍŽE, *Výkonnost podniku a její zvyšování* [online]. c2005. [cit. 17.9.2011]. Dostupné z:<[http://striz8.fame.utb.cz/msmt2008b/index\\_soubory/Page662.htm](http://striz8.fame.utb.cz/msmt2008b/index_soubory/Page662.htm)>.
- [63] VEBER, J., et al. *Řízení jakosti a ochrana spotřebitele*. 2. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2007, 204 str., ISBN 978-80-247-1782-1.
- [64] TUTORIALS POINT.COM, *Cause and effect diagram* [online]. c2011. [cit. 17.9.2011]. dostupné z:<[http://www.tutorialspoint.com/management\\_concepts/cause\\_and\\_effect\\_diagram.htm](http://www.tutorialspoint.com/management_concepts/cause_and_effect_diagram.htm)>.
- [65] NEW PRODUCT DEVELOPMENT SOLUTIONS, *Failure modes and effects analysis (FMEA)* [online]. c2002. [cit. 4.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.npd-solutions.com/fmea.html>>.
- [66] FMEA – FMECA.COM, *FMEA and FMECA information* [online]. c2011. [cit. 4.9.2011]. dostupné z:<<http://www.fmea-fmea.com/>>.
- [67] VLASTNÍ CESTA.CZ, *FMEA - Analýza možných vad a jejich důsledků* [online]. c2011. [cit. 4.9.2011]. Dostupné z:<<http://www.vlastnicesta.cz/metody/metody-kvalita-system-kvality-iso/fmea-analyza-moznych-vad-a-jejich-dusledku/>>.
- [68] VŠB TECNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, *Statistické plánování experimentů pro účely vyhodnocování kvality pájených spojů* [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z:<<http://katedry.fmmi.vsb.cz/639/qmag/st12-cz.pdf>>.
- [69] THE QUALITY PORTAL, *Design of Experiments : Overview* [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z:<[http://thequalityportal.com/q\\_know02.htm](http://thequalityportal.com/q_know02.htm)>.
- [70] JPM, [online]. *Design of Experiments* [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z:<[http://www.jmp.com/support/downloads/pdf/jmp8/jmp\\_doe\\_guide.pdf](http://www.jmp.com/support/downloads/pdf/jmp8/jmp_doe_guide.pdf)>.
- [71] ASQ, *Data Collection and Analysis Tools* [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z:<<http://asq.org/learn-about-quality/data-collection-analysis-tools/overview/design-of-experiments.html>>.
- [72] MANAGEMENT MANIA, *DOE (Design of Experiments)* [online]. c2011. [cit. 10.9.2011]. Dostupné z:<<http://managementmania.com/index.php/component/content/article/486>>.

- [73] BIMMER TODAY, *Technische Details zum Motor von BMW X5 M & X6 M (S63)* [online]. c2012. [cit. 23.3.2012]. Dostupné z:<  
<http://www.bimmertoday.de/2009/05/05/technische-details-zum-motor-von-bmw-x5-m-x6-m/>>.
- [74] AUTO HIT, *BMW M5 (F10)* [online]. c2012. [cit. 23.3.2012]. Dostupné z:<  
<http://www.autohit.cz/superauta/auto/bmw-m5-f10>>.
- [75] AUTO MOBIL REVUE, *BMW X5M a X6M - Poněkud jiné M* [online]. c2011. [cit. 23.3.2012]. Dostupné z:< [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/novinky/bmw-x5m-a-x6m-ponekud-jine-m\\_39755.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/novinky/bmw-x5m-a-x6m-ponekud-jine-m_39755.html)>.
- [76] CUMMINS TURBO TECHNOLOGIES, *Laboratory Operations* [online]. c2012. [cit. 10.3.2012]. Dostupné z:< [http://www.holset.co.uk/mainsite/files/2\\_4\\_3\\_3-Laboratory%20Operations%20.php](http://www.holset.co.uk/mainsite/files/2_4_3_3-Laboratory%20Operations%20.php)>.
- [77] E HOW, *How a turbo wastegate works* [online]. c2011. [cit. 11.9.2011]. dostupné z:<[http://www.ehow.com/how-does\\_5412665\\_turbo-wastegate-works.html](http://www.ehow.com/how-does_5412665_turbo-wastegate-works.html)>.
- [78] STANĚK, L. *Regulace turbodmychadel. Brno*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vančura.
- [79] FSI ČVUT, *FMEA* [online]. c2011. [cit. 22.9.2011]. dostupné z:<  
[http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/RJ/metoda\\_fmea.pps](http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/RJ/metoda_fmea.pps)>.
- [80] RELIA SOFT, *Examining Risk Priority Numbers in FMEA* [online]. c2011. [cit. 22.9.2011]. dostupné z:< <http://www.reliasoft.com/newsletter/2q2003/rpns.htm>>.
- [81] NASKL, *Klinické aspekty validace kvantitativních metod* [online]. c2012. [cit. 14.4.2012]. dostupné z:<  
<http://www.naskl.cz/rada/zapisy/doc/POSTUP%20PRO%20VALIDACI%20-%20def..pdf>>.
- [82] KSQ, *Metoda R&R Online* [online]. c2012. [cit. 28.4.2012]. dostupné z:<  
[http://www.ksq.cz/metoda\\_rar](http://www.ksq.cz/metoda_rar)>.
- [83] NAVRÁTIL, T. *Název: Optimalizace kontrolních procesů ve výrobě satorů elektromotorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 38 s. Vedoucí práce doc. Ing. JIRÍ PERNIKÁR, CSc.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 102
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

[84] BUSINESS VIZE, *Paretova (ABC) analýza – mocný nástroj v logistice, marketingu i obchodu* [online]. c2012. [cit. 28.4.2012]. dostupné z:< <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/paretova-abc-analyza-mocny-nastroj-v-logistice-marketingu-i-obchodu>>.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### Seznam použitých zkratk

<i>BMW</i>	- Bayerische Motoren Werke
<i>DFSS</i>	- Design For Six Sigma
<i>VNT</i>	- Variable Nozzle Turbine
<i>WG</i>	- Waste-gate
<i>TPS</i>	- Toyota Production Systém
<i>DMAIC</i>	- Define Measure Analyze Improve Control
<i>CTQ</i>	- Critical to Quality
<i>VOC</i>	- Voice of Customer
<i>DOE</i>	- Design of Experiment
<i>FMEA</i>	- Failure Mode and Effects Analysis
<i>DMADV</i>	- Define Measure Analyze Design Verify
<i>IDC</i>	- Integrated Design Center
<i>HTS</i>	- Honeywell Technology Solution
<i>HTT</i>	- Honeywell Turbo Technologies
<i>US CAFE</i>	- United States Corporate Average Fuel Economy
<i>VGT</i>	- Variable Geometry Turbocharger
<i>REA</i>	- Rotary Electrical Actuator
<i>SREA</i>	- Simple Rotary Electronic Actuator
<i>DC</i>	- Direct Current
<i>VW</i>	- Volkswagen
<i>HPI</i>	- High Precision Injection
<i>QFD</i>	- Quality Function Deployment
<i>HOQ</i>	- House of Quality
<i>ExtFA</i>	- Externí funkční analýza
<i>PEP</i>	- Product Evolution Process
<i>PRA</i>	- Preliminary Risk Assessment
<i>FTA</i>	- Fault Tree Analysis
<i>FEA</i>	- Finite Element Methods
<i>YR</i>	- Yield Ration
<i>TIG</i>	- Tungsten-Inert-Gas
<i>EBW</i>	- Electron beam welding
<i>CAE</i>	- Computer-aided Engineering
<i>SUV</i>	- Sportovně užitkový vůz

## Seznam použitých symbolů a veličin

$Max S1$	[MPa]	- maximální napětí v tahu
$Min S3$	[MPa]	- maximální napětí v tlaku
$Max Seqv$	[MPa]	- maximální redukované napětí
$Max YR$	[-]	- poměr redukovaného napětí a meze kluzu
$F$	[N]	- síla mezi podložkou a ramenem obtokového ventilu

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

### Seznam obrázků

Obr. 1- 1 DMAIC I	19
Obr. 1- 2 Portfolio firmy Honeywell	24
Obr. 1- 3 Portfolio HTS	25
Obr. 1- 4 Tepelný oběh turbodmychadla	26
Obr. 1- 5 Turbínová skříň	27
Obr. 1- 6 Kompresorová skříň	28
Obr. 1- 7 Rotační skupina	29
Obr. 1- 8 Ložisková skříň s rotační skupinou	29
Obr. 1- 9 Turbínové kolo	30
Obr. 1- 10 Kompresorové kolo	30
Obr. 1- 11 Turbodmychadlo s regulací pomocí waste-gatu	31
Obr. 1- 12 Turbodmychadla s proměnnou geometrií rozváděcích lopatek turbíny (VNT)	33
Obr. 1- 13 VNT mechanismus s uzavřenými (vlevo) a otevřenými lopatkami	33
Obr. 1- 14 Turbodmychadlo s proměnnou šířkou statoru turbíny (VGT)	34
Obr. 1- 15 Pneumatický přetlakový aktuátor	35
Obr. 1- 16 Řez přetlakových aktuátorem	36
Obr. 1- 17 M TwinPower Turbo for BMW X5 M and BMW X6 M	40
Obr. 1- 18 Detail motoru s turbodmychadlem Twin scroll	40
Obr. 1- 19 High Precision Injection (HPI)	41
Obr. 4- 1 VOC->CTQ	48
Obr. 4- 2 Analýza požadavků zákazníka QFD	49
Obr. 4- 3 Ishikawův diagram	52
Obr. 5- 1 M TwinPower Turbo pro BMW X5 M a BMW X6 M	56
Obr. 5- 2 M TwinPower Turbo s kříženými jednodílnými výfukovými svody [74]	56
Obr. 5- 3 Změny tzv. základního designu ramene a klapky ventilu	58
Obr. 5- 4 Změny designu GEN 2 ramene a klapky ventilu	58
Obr. 5- 5 Design GEN 3 ramene a klapky ventilu	58
Obr. 5- 6 Konečný design klapky a ramene ventilu (GEN 2 (vlevo); GEN 3)	58
Obr. 5- 7 FEA analýza ramene a klapky s anti-rotačními čepy	59
Obr. 5- 8 FEA analýza klapky s anti-rotačními čepy	59
Obr. 5- 9 Rameno a klapka ventilu jako tzv. monoblock	60
Obr. 5- 10 Poškození ramene obtokového ventilu po zátěžovém testu	60
Obr. 5- 11 Poškození ramene obtokového ventilu při zátěžovém testu D20	62
Obr. 5- 12 Poškození ramene obtokového ventilu při zátěžovém testu D60	63
Obr. 5- 13 Poškození klapky obtokového ventilu při zátěžovém testu DE10	63
Obr. 5- 14 Poškození TIG svaru mezi ramenem a klapkou obtokového ventilu při zátěžovém testu DE10	64
Obr. 5- 15 Poškození připojovacího radiusu čepu ventilu při zátěžovém testu D60	64
Obr. 5- 16 Sestava turbínové skříňe se zaslepenými přírubami	66
Obr. 5- 17 Princip měření těsnosti turbínové skříňe	66



Obr. 5- 18 Přípravek pro měření netěsnosti obtokového ventilu I	69
Obr. 5- 19 Přípravek pro měření netěsnosti obtokového ventilu II	70
Obr. 5- 20 Popis speciálního přípravku	71
Obr. 5- 21 Konstrukční prvky na turbínové skříni	73
Obr. 5- 22 Ishikawův diagram polohy ramene	77
Obr. 5- 23 Speciální přípravek zapojený v tzv. zkušebním okruhu	81
Obr. 5- 24 Variabilita součástí (Components of Variation)	84
Obr. 5- 25 Rozptyl měření pro každého operátora (R chart by Operator)	84
Obr. 5- 26 Rozptyl měření vztažen k celkovému průměru pro každého operátora (Xbar chart by Operator)	85
Obr. 5- 27 Analýza R&R	85
Obr. 5- 28 Graf hlavních efektů (Main Effects Plot)	88
Obr. 5- 29 Graf vzájemných interakcí (Interaction Plot)	89
Obr. 5- 30 Grafy reziduálních chyb	89
Obr. 5- 31 Výsledky DOE analýzy	90

## 10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1- 1 Nástroje DMAIC	22
Tab. 5- 1 Technické parametry motoru	57
Tab. 5- 2 Výsledky FEA analýzy	59
Tab. 5- 3 Netěsnost klapky a sedla obtokového ventilu (1 bar, 25°C)	68
Tab. 5- 4 Netěsnost klapky a sedla obtokového ventilu (0,7 baru, 25°C)	68
Tab. 5- 5 Netěsnost mezi ramenem a pouzdrem obtokového ventilu (1 bar, 25°C) I	68
Tab. 5- 6 Netěsnost mezi ramenem a pouzdrem obtokového ventilu (1 bar, 25°C) II	68
Tab. 5- 7 Netěsnost mezi ramenem a pouzdrem obtokového ventilu (2 bary, 25°C)	69
Tab. 5- 8 Hlas zákazníka (VOC – Voice of Customer)	72
Tab. 5- 9 Technické požadavky	73
Tab. 5- 10 Analýza požadavků zákazníka	74
Tab. 5- 11 Externí funkční analýza	75
Tab. 5- 12 Předběžné hodnocení rizik	76
Tab. 5- 13 FMEA	78
Tab. 5- 14 FMEA - vybrané kritické příčiny	79
Tab. 5- 15 Mezní hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti	83
Tab. 5- 16 Hodnoty poklesu tlaku v systému naměřené operátorem č. 1	83
Tab. 5- 17 Hodnoty poklesu tlaku v systému naměřené operátorem č. 2	83
Tab. 5- 18 Vstupní naměřená data pro analýzu DOE	87